This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.

+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.

+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.

+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

UC-NRLF
B 4 501 607

LIBRARY
OF THE
UNIVERSITY OF CALIFORNIA
GIFT OF
MRS. MARY WOLFSOHN
IN MEMORY OF
HENRY WOLFSOHN

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Das Buch

der

physikalischen Erscheinungen.

Digitized by Google

Digitized by Google

Das Buch

der

physikalischen Erscheinungen.

Frei nach A. Guillemin

von

Dr. L. Rudolf Schulze,

Oberlehrer an der königl. Realschule zu Döbeln.

Mit 11 Chromolithographien, 9 großen Abbildungen außerhalb des Textes und 448 Holzschnitten.

LIBRARY OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA

Leipzig,

Verlag von Paul Frohberg.

1877.

Digitized by Google

2C71
F83

Digitized by Google

1176

Inhalt.

Erstes Buch. Die Schwere.

Seite

I. Kapitel. Allgemeine Erscheinungen der Schwere.

§ 1. Wirkung der Schwere an der Oberfläche der Erde. Erscheinungen des Gleichgewichts und der Bewegung 3

§ 2. Die Schwere im Himmelsraume; allgemeine Massenanziehung 9

II. Kapitel. Gesetze der Schwerkraft.

§ 1. Der freie Fall der Körper. — Gleiche Geschwindigkeit beim Fall der Körper im leeren Raume 15

§ 2. Fall der Körper. — Richtung des Falles 18

§ 3. Fall der Körper. — Galilei's Gesetze 21

III. Kapitel. Gesetze der Schwerkraft. — Das Pendel.

§ 1. Gleichheit der Schwingungsdauer eines Pendels. Verhältniß der Schwingungsdauer zur Pendellänge 32

§ 2. Anwendung des Pendels zur Bestimmung der Gestalt und Dichtigkeit der Erde 38

IV. Kapitel. Gewicht der Körper.

§ 1. Gleichgewicht schwerer Körper. — Schwerpunkt 44

§ 2. Bestimmung des Gewichtes der Körper. — Die Wage 50

V. Kapitel. Wirkung der Schwerkraft auf Flüssigkeiten.

§ 1. Eigenschaften der flüssigen Körper 57

§ 2. Gesetz der Ausgleichung des Druckes 61

§ 3. Gleichgewicht der Körper, welche in eine Flüssigkeit getaucht sind. Archimedisches Princip 72

§ 4. Bestimmung der Dichtigkeit der Körper 79

VI. Kapitel. Wirkung der Schwerkraft auf luftförmige Körper.

§ 1. Die Luft und andere Gase sind schwer und elastisch 85

§ 2. Der Luftdruck 90

§ 3. Das Barometer 96

VII. Kapitel. Schwere der Luft und der Gase.

§ 1. Die Pumpen. — Der Heber 105

§ 2. Ausdehnung und Zusammendrückung der Gase. — Die Luftpumpe . . . 110

§ 3. Das Mariotte'sche Gesetz 120

Zweites Buch. Der Schall.

I. Kapitel. Entstehung und Ausbreitung des Schalles.

§ 1. Schallerscheinungen in der Natur 123

§ 2. Verschiedene Arten der Schallerregung 126

§ 3. Ausbreitung des Schalles in festen, flüssigen und luftförmigen Körpern 129

§ 4. Geschwindigkeit des Schalles in der Luft und anderen Mitteln 133

§ 5. Erscheinungen der Reflexion und der Brechung des Schalles 140

Digitized by Google

Seite

II. Kapitel. Die Schallschwingungen.

§ 1. Schwingungen fester, flüssiger und luftförmiger Körper 146
§ 2. Höhe der Töne 153
§ 3. Stärke des Schalles 159
§ 4. Ausbreitung des Schalles in der Luft. — Schallwellen 164
§ 5. Gesetze der Schallschwingungen der Saiten 169
§ 6. Gesetze der Schwingungen der Luft in Röhren 175
§ 7. Schallschwingungen der Stäbe und Platten 179

III. Kapitel. Die musikalischen Töne.

§ 1. Die Tonleiter 183
§ 2. Optische Untersuchung der Schwingungsverhältnisse 193
§ 3. Klangfarbe der Töne 203

IV. Kapitel. Gehör und Stimme.

§ 1. Das Ohr des Menschen 208
§ 2. Die Sprachwerkzeuge des Menschen 214

Drittes Buch. Das Licht.

I. Kapitel. Die Quellen des Lichtes.

§ 1. Allgemeine Erscheinungen 217
§ 2. Quellen des Lichtes 219

II. Kapitel. Ausbreitung des Lichtes in gleichartigen Mitteln.

§ 1. Geradlinige Ausbreitung des Lichtes 221
§ 2. Schatten und Halbschatten 225
§ 3. Geschwindigkeit des Lichtes 230

III. Kapitel. Reflexion des Lichtes.

§ 1. Gesetze der Reflexion 238
§ 2. Bilder in ebenen Spiegeln 241
§ 3. Bilder in sphärischen Spiegeln 246
§ 4. Bilder in cylindrischen und kegelförmigen Spiegeln. Unregelmäßig reflectirtes Licht 256

IV. Kapitel. Brechung der Lichtstrahlen.

§ 1. Allgemeine Erscheinungen und Gesetze der Strahlenbrechung 261
§ 2. Totale Reflexion. Astronomische Strahlenbrechung 268
§ 3. Brechung der Lichtstrahlen in Platten mit parallelen Flächen und in Prismen 273
§ 4. Brechung des Lichtes in Linsen 278

V. Kapitel. Zerlegung des Lichtes.

§ 1. Zerlegung und Zusammensetzung des weißen Lichtes 291
§ 2. Die Farben der Körper 299
§ 3. Die Streifen im Sonnenspectrum. — Die Spectralanalyse 308
§ 4. Die wärmenden, leuchtenden und chemischen Strahlen der Sonne . . . 317
§ 5. Erscheinungen der Phosphorescenz 321
§ 6. Das Wesen des Lichtes 327

VI. Kapitel. Interferenz der Lichtwellen. Diffraction der Lichtstrahlen.

§ 1. Interferenz der Lichtwellen 333
§ 2. Erscheinungen der Diffraction 338
§ 3. Farben dünner Platten 342

VII. Kapitel. Doppelte Brechung des Lichtes. — Polarisation.

§ 1. Erscheinung der doppelten Brechung in den Krystallen 350
§ 2. Polarisation des Lichtes durch doppelte Brechung 358
§ 3. Polarisation durch Reflexion 366
§ 4. Farben des polarisirten Lichtes 369

Digitized by Google

Seite

VIII. Kapitel. Messung der Stärke der Lichtquellen.
§ 1. Principien der Photometrie 379
§ 2. Das Photometer 384
IX. Kapitel. Das Auge des Menschen 388

Viertes Buch. Die Wärme.

I. Kapitel. Ausdehnung der Körper durch Wärme. — Aenderung des Aggregatzustandes.
§ 1. Erscheinungen der Ausdehnung und Zusammenziehung 395
§ 2. Messung der Temperatur. Die Thermometer 400
§ 3. Messung der Ausdehnung fester Körper 412
§ 4. Messung der Ausdehnung der Flüssigkeiten und Gase 419
§ 5. Aenderung des Aggregatzustandes. — Schmelzen und Erstarren der Körper 423
§ 6. Verdampfung und Condensation der Dämpfe 428
II. Kapitel. Ausbreitung der Wärme.
§ 1. Strahlende Wärme 437
§ 2. Reflexion der Wärmestrahlen 439
§ 3. Brechung der Wärmestrahlen 442
§ 4. Ausstrahlung und Reflexion der Wärme 445
§ 5. Transmission der Wärme 452
§ 6. Ausbreitung der Wärme durch Leitung 455
III. Kapitel. Calorimetrie.
§ 1. Specifische und latente Wärme. Calorimeter 462
§ 2. Quellen der Wärme. — Sonnenwärme 470
§ 3. Wärme, welche sich durch chemische Verbindung entwickelt 475
§ 4. Wärme, welche durch mechanische Thätigkeit entwickelt wird 478
§ 5. Die Wärme als Bewegung. — Mechanisches Aequivalent der Wärme . . 482

Fünftes Buch. Magnetismus und Elektricität.

I. Kapitel. Die Magnete.
§ 1. Erscheinungen der magnetischen Anziehung und Abstoßung 487
§ 2. Magnetisirung des Stahles 492
II. Kapitel. Die Elektricität.
§ 1. Erscheinungen der elektrischen Anziehung und Abstoßung 505
§ 2. Gesetze der elektrischen Anziehung und Abstoßung. — Vertheilung der Elektricität auf der Oberfläche der Körper 514
III. Kapitel. Die Elektrisirmaschinen.
§ 1. Elektricität durch Vertheilung 517
§ 2. Elektroskope und Elektrometer 521
§ 3. Die Elektrisirmaschinen 523
§ 4. Verschiedene elektrische Versuche 532
§ 5. Verdichtung der Elektricität. Die Leydener Flasche 535
IV. Kapitel. Galvanismus.
§ 1. Elektricität durch Berührung 551
§ 2. Constante galvanische Ketten 560
§ 3. Physikalische, chemische und physiologische Wirkungen der Ströme . . . 563
V. Kapitel. Elektromagnetismus und Induction.
§ 1. Wirkung eines Stromes auf die Magnetnadel. — Ampère's Gesetze . . 568
§ 2. Wirkung der Ströme auf einander. — Theorie des Magnetismus . . . 574
§ 3. Die Elektromagnete 578
§ 4. Erscheinungen der Induction 582

Digitized by Google

Seite

VI. Kapitel. Das elektrische Licht.

§ 1. Funken bei der Entladung der statischen Elektricität 590
§ 2. Der Volta'sche Bogen 595

Sechstes Buch. Die Meteore.

§ 1. Optische Erscheinungen. — Die Luftspiegelung. — Der Regenbogen . . 600
§ 2. Atmosphärische Feuchtigkeit 607
§ 3. Elektrische und magnetische Meteore. — Das Nordlicht 616

Verzeichniß der Chromolithographien und der Abbildungen außerhalb des Textes . 623
Berichtigungen 624

Digitized by Google

Das

Buch der physikalischen Erscheinungen.

Digitized by Google

Digitized by Google

LIBRARY OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA

Erstes Buch.

Die Schwere.

Erstes Kapitel.

Allgemeine Erscheinungen der Schwere.

§ 1. Wirkung der Schwere an der Oberfläche der Erde. Erscheinungen des Gleichgewichts und der Bewegung.

Wird ein Stein in einiger Höhe über dem Erdboden sich selbst überlassen, so stürzt er herab und kommt nicht eher zur Ruhe, als bis er den festen Grund erreicht hat; ein Körper von runder Gestalt, z. B. eine Kugel, rollt auf einer gegen den Horizont geneigten Ebene herab; flüssige Massen, wie das Wasser der Bäche und Flüsse, gleiten über die geneigte Fläche, welche ihnen als Bett dient; der Rauch, der Wasserdampf erhebt sich in der Luft. Alle diese Erscheinungen und noch viele andere, welche wir später besprechen werden, sind nur verschiedene Wirkungen einer und derselben Kraft, welche überall in der ganzen Natur herrscht, der Schwerkraft.

Alle Körper ohne Ausnahme, welche sich auf der Oberfläche unseres Planeten, in den Tiefen des Erdbodens und in den Luftschichten unserer Atmosphäre vorfinden, sind schwer. Für feste und flüssige Körper ist diese Thatsache von jeher allgemein bekannt gewesen: daß sie auch für Gase und Dämpfe gültig ist, werden wir bald zeigen. Nicht allein durch Bewegungserscheinungen macht sich die Schwerkraft bemerklich; sie wirkt ebensogut ohne Unterbrechung auf diejenigen Körper, welche zu ruhen scheinen, welche sich aber in Wirklichkeit nur im Gleichgewichte

Digitized by Google

befinden: denn absolute Ruhe herrscht, soweit unsere Kenntniß reicht, nirgends im Weltreich. Wenn wir den Weg des fallenden Steines mit unserem Auge verfolgt haben, und nun sehen, daß er am Erdboden ruhig liegen bleibt, so fährt er doch fort auf die Körper zu drücken, welche jetzt seine Unterlage bilden; diesen Druck, den man durch die beständige Spannung einer Feder (Fig. 1.) anschaulich machen kann, und den man als das Gewicht des Körpers bezeichnet, empfinden wir selbst durch die Anstrengungen, welche die Muskeln unserer Hand machen müssen, um den Stein frei zu halten. Ein Buch, das auf dem Tische liegt, bleibt zwar unbeweglich, aber es drückt auf den Tisch, welcher selbst wieder auf den Erdboden einen Druck ausübt. Eine Metallmasse, welche am unteren Ende eines Fadens oder einer Saite aufgehängt ist, spannt dieselben; und diese Spannung, welche beständig fortdauert, so lange man den Faden nicht durchschneidet, ist der beste Beweis dafür, daß die Schwerkraft ohne Unterbrechung auf den aufgehängten Körper fortwirkt.

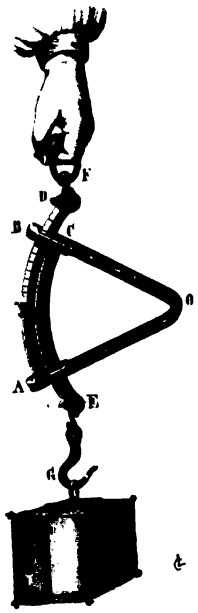


Fig. 1. Wirkung der Schwerkraft veranschaulicht durch Spannung einer Feder.

Hierdurch ist nun ganz klar bewiesen, daß, wenn ein Körper sich nicht bewegt, daraus nicht folgt, daß er keiner Kraft unterworfen ist; wir haben wohl das Recht zu behaupten, daß auf der Erde kein Körper, ja nicht einmal der kleinste Theil eines Körpers, mag derselbe nun fest, flüssig oder luftförmig sein, in irgend einem Augenblicke der Wirkung der Schwerkraft entzogen ist.

Die Astronomie lehrt uns, daß die Erde eine nahezu kugelförmige Gestalt besitzt, und daß sie zwei Bewegungen gleichzeitig ausführt, an denen alle Körper, die ihr angehören, mit Theil nehmen; die eine dieser Bewegungen besteht in einer gleichförmigen Drehung um den einen Durchmesser, die andere ist eine fortschreitende Bewegung in einer länglichen Bahn um die Sonne, welche mit wechselnder Geschwindigkeit durchlaufen wird. Aber das Gleichgewicht ihrer einzelnen Theile wird weder durch die eine noch die andere dieser Bewegungen beeinflußt. Die festen Massen, welche die äußere Schale der Erde bilden, der innere

Digitized by Google

Kern, welcher sich vermuthlich im weißglühenden, geschmolzenen Zustande befindet, der flüssige Theil der Oberfläche oder die Meere und endlich die gasförmige Hülle, welche die Kugel von allen Seiten umgiebt, sind in einem Zustand des gegenseitigen Gleichgewichtes, der durch den Druck der einzelnen Theile aufeinander infolge der Schwerkraft herbeigeführt wird.

Es ist wahrscheinlich, daß die ganze Erde einst flüssig gewesen ist*) und daß sich die verschiedenen Schichten, aus denen das Innere besteht, nach der Reihenfolge ihrer Dichtigkeit gelagert haben, d. h. daß die schwersten sich im Mittelpunkte, die leichtesten an der Oberfläche befinden, denn auf diese Weise würden die Bedingungen erfüllt sein, welche man für das Gleichgewicht der flüssigen Körper unter dem Einfluß der Schwerkraft gefunden hat. Doch auch wenn wir von den Theilen der Erde absehen, welche unserer Beobachtung unzugänglich sind, zeigt sich bei den übrigen genau dieselbe Anordnung und Reihenfolge: am Grunde die *feste* Masse oder der *Erdboden*; darauf folgt auf drei Viertel der Oberfläche der *flüssige* Theil oder das *Meer*; endlich über beiden die *gasförmigen* Stoffe oder die *Luft*.

Alle diese verschiedenen Theile lasten aufeinander.

Wenn wir den Boden der Festländer oder Inseln prüfen, so sehen wir, daß die Gestalt seiner Oberfläche eine solche ist, daß alle seine Theile sich gegenseitig als Stützen dienen. In den Bergen wie in den Ebenen sind die Massen durch die Schwerkraft, welche auf alle einzelnen Theilchen wirkt, so vertheilt, daß das Gleichgewicht nie oder doch wenigstens höchst selten gestört ist. Dächten wir uns, daß die Thätigkeit der Schwerkraft aufhörte, so würden die anderen Naturkräfte ohne Widerstand zu finden die Länder, Felsen und Berge umstürzen und überall an Stelle der Ordnung, welche eine Folge des Gleichgewichts der Massen ist, nur Unordnung und Verwirrung setzen.

In gleicher Weise benutzt der Mensch als Nachahmer der Natur den Druck durch die Schwerkraft, um seine dauerhaftesten Gebäude zu errichten. Dadurch, daß er feste Materialien senkrecht, oder noch besser

*) Dieser Hypothese, als deren Urheber gewöhnlich Laplace genannt wird, ist in neuerer Zeit durch die Schule der Jungneptunisten, als deren Hauptvertreter Bischof in Bonn angesehen werden kann, vielfach widersprochen worden; wir wollen dieselbe vorläufig noch beibehalten.

Digitized by Google

in einer etwas geneigten Böschung aufrichtete, wie bei den Pyramiden Egyptens, ist es dem Menschen gelungen, Denkmäler zu errichten, welche den zerstörenden Wirkungen der Elemente bereits Jahrhunderte lang Trotz geboten haben.

Die Schwerkraft erhält auch die Wassermassen in ihren natürlichen Betten, Seen und Meere in ihren Grenzen, in denen die Flüssigkeiten in Ruhe bleiben würden, wenn nicht äußere Kräfte beständig ihre oberen Schichten beunruhigten. Es kommt vor, daß unter dem Einflusse von unregelmäßig wirkenden Kräften irdischen Ursprunges, wie z. B. von Erdbeben und Stürmen, sowie durch die regelmäßige Schwankung der Ebbe und Fluth, das Meer sich sehr hoch erhebt und seine Grenzen vollständig verläßt. Bald aber kehrt es in seinen gewöhnlichen Gleichgewichtszustand zurück und gelangt zu größerer Ruhe theils durch das Gewicht seiner Bestandtheile, theils durch die Reibung der Theilchen an einander, welche die Bewegung verzögert: für beide Ursachen der Rückkehr in den Gleichgewichtszustand ist die Grundursache die Schwerkraft. Als Laplace die Bedingungen aufsuchte, unter welchen das Gleichgewicht der Meere ein absolut beständiges ist, fand er als einzige Bedingung, daß die Dichtigkeit der Gewässer des Oceans etwas geringer sei, als die der Erde, und gerade diese Bedingung ist in der Natur erfüllt. Wären die Gewässer des Meeres noch leichter, so würden sie sich beständig in der größten Unruhe befinden; wären sie dagegen schwerer, so würden die Störungen des Gleichgewichts durch zufällige Ursachen auf den Festländern und Inseln die furchtbarsten Katastrophen herbeiführen.

Aber die Schwerkraft wirkt nicht allein auf die Massen, aus denen der feste Boden und die Gewässer bestehen: auch die Luftschichten sind ihr in gleicher Weise unterworfen. Ohne diesen Druck, welcher sie an den Boden gefesselt hält, würde einerseits die Elasticität oder Expansionskraft, welche wie wir bald sehen werden, eine Grundeigenschaft der Gase ist, andererseits die Centrifugalkraft infolge der Umdrehung der Erde, die ganze Atmosphäre in den Weltenraum zerstreuen. Dies sind im Allgemeinen die Erscheinungen, welche durch die beständige und sozusagen verborgene Wirkung der Schwerkraft auf dem Erdballe hervorgebracht werden. Sie hält das Gleichgewicht überall aufrecht und stellt es wieder her, wenn es durch andere Naturkräfte gestört war.

Doch auch die Erscheinungen der Bewegung, welche durch dieselbe

Digitized by Google

Kraft hervorgerufen werden, gewähren ein Bild, das nicht minder interessant und großartig ist.

Dieses unwiderstehliche Streben aller Körper nach dem Mittelpunkte der Erde bewirkt, daß die Gewässer bis auf verschiedene Tiefen in den Erdboden eindringen; durch dieses Einsickern wird das Erdreich und das feste Gestein gelockert, es erfolgen Bergrutsche, welche die Seiten der Berge und Hügel entblößen und endlich die Thäler ausfüllen. Für diese Erscheinungen ist die Schwerkraft nicht die einzige Ursache; wir werden später sehen, wie sie mit anderen physikalischen oder chemischen Kräften, besonders im Verein mit der Wärme, die Mehrzahl der Bewegungen hervorbringt, für welche die Oberfläche unserer Erde und ihre Atmosphäre der beständige Schauplatz ist; doch immer spielt die Schwerkraft bei allen diesen Erscheinungen eine Hauptrolle.

Häufig ist das Werk der Zerstörung nicht wahrnehmbar bis zu dem Augenblicke, wo die Katastrophe hereinbricht. Ungeheure Felsmassen, welche an ihrer Grundfläche unterhöhlt sind, verlieren plötzlich das Gleichgewicht und gleiten oder stürzen herab, indem sie Alles auf ihrem Wege zerstören. Ganze Berge haben auf diese Weise Dörfer und Städte mit ihren Trümmern bedeckt, und die Geschichte hat zahlreiche Beispiele dieser furchtbaren Ereignisse aufgezeichnet. Im dreizehnten Jahrhundert stürzte der Berg Grenier, dessen Gipfel noch jetzt die Berge auf der Südseite des Thals von Chambéry überragt, zum Theil ein und begrub die kleine Stadt Saint-André und mehrere Dörfer: noch jetzt zeigt man die Abgründe von Myans, welche die Trümmer der menschlichen Wohnungen und die Leichen ihrer Bewohner bedecken. Ein nicht minder schrecklicher Bergrutsch stürzte im Jahre 1806 von den Seiten des Berges Ruffi im Goldauer Thale eine ungeheure Masse Felsen herab, welche mehrere Dörfer vollständig verschütteten und einen kleinen See in der Nachbarschaft zum Theil ausfüllten. Es ist nicht nöthig, die Größe der zerstörenden Gewalt solcher Massen, welche durch die Schwerkraft häufig aus furchtbarer Höhe herabgeschleudert werden, und deren Geschwindigkeit mit dem Wege wächst, durch Rechnung nachzuweisen.

Die Lawinen sind Erscheinungen derselben Art, nur viel häufiger als die Bergrutsche und Bergstürze: bei ihnen gleiten die Schneemassen, welche auf den geneigten Flächen eines Berges oder am Rande eines Abgrundes angehäuft sind, durch ihr eigenes Gewicht herab, lösen sich

Digitized by Google

los und stürzen hernieder, Alles in ihrem Falle zermalmend. Oft genügt ein kleiner Anstoß, etwa ein Pistolenschuß, ja selbst ein Schrei, um das Gleichgewicht zu stören und die Erscheinung hervorzurufen. Bei den Eisbergen der Polargegenden bewirkt der Druck der Blöcke auf einander ähnliche Erscheinungen, bei denen die unwiderstehliche Kraft der Schwere ihre Macht beweist. Die Gletscher, diese Ströme festen Schnees, welcher zu dichtem Eis zusammengedrückt ist, werden an den Abhängen der Berge durch den Druck des Gewichtes der höheren Schichten herabgepreßt; und diese langsam fortschreitende Bewegung ist so energisch, daß die Felsen, an und auf welchen diese Bewegung geschieht, durch die krystallinische Masse und die eingeschlossenen Felstrümmer geritzt und geschliffen werden*).

Bei vulkanischen Ausbrüchen schleudern die eingeschlossenen Gase bei ihrer Explosion häufig Asche, Steintrümmer, ja ganze Felsen in die Luft: obgleich diese Massen für einen Augenblick durch die Kraft des Stoßes aus dem Innern der Erde der Wirkung der Schwerkraft entzogen scheinen, so ist der Widerstreit dieser beiden Kräfte doch nicht von langer Dauer, und bald gehorchen diese Auswürflinge dem unabänderlichen Gesetz, dem alle irdischen Körper unterworfen sind. Dasselbe Gesetz bewirkt den Fall des Hagels, des Regens, des Schnees, d. h. der Theile des Wasserdampfes, welche durch Verdichtung schwerer geworden sind als die Schichten, bis zu welchen sie unter dem vereinigten Einfluß der Wärme und der Schwerkraft erhoben waren.

Bis hierher haben wir nur von dem eigentlichen Falle der Körper, deren Gleichgewicht durch irgend eine Ursache gestört war, gesprochen: aber es giebt auf der Oberfläche unseres Planeten eine ganze Reihe anderer Bewegungen, bei denen die Schwerkraft die Hauptrolle spielt und welche sich in einem wunderbaren Kreislaufe an einander anschließen, ohne welchen alles Leben auf der Erde bald erlöschen würde.

Die ununterbrochene Verdampfung des Wassers verursacht die Bildung der Wolken, welche durch den Unterschied des Gewichtes der Luft und der Dampftheilchen, aus denen sie bestehen, in die oberen Theile der Atmosphäre erhoben werden. Das Wasser verdichtet sich wieder zur flüssigen Form, fällt, getrieben durch die Schwerkraft, auf die niedrigeren

*) Reclus-Ule, Die Erde S. 180. (Verlag v. P. Frohberg in Leipzig.)

Digitized by Google

Orte herab, und bildet Bäche, Flüsse und Ströme: nun folgt es der natürlichen Neigung des Bodens und vereinigt sich mit den Fluthen des Meeres, indem es bald in majestätischem Strome langsam dahin fließt, bald mit größerer Geschwindigkeit geräuschvoll über ein steileres Bett herabrollt. Manchmal breiten sich die Gewässer, durch natürliche Hindernisse aufgehalten, in Form von Seen aus; bisweilen auch kommen sie an den Rand einer Felsmauer, über welche sie sich in Form von Wasserfällen herabstürzen: wir wollen nur an den Rheinfall bei Schaffhausen, den Niagara-Fall in Nordamerika und die Kataraкten des Zambese im südlichen Afrika erinnern.

Doch nicht nur auf dem festen Theile der Erdoberfläche treffen wir Ströme: auch der Ocean wird von Strömungen durchfurcht, deren Bewegung durch die Schwerkraft in ihrer Regelmäßigkeit erhalten wird, wenn sie auch durch die Einwirkung einer anderen Naturkraft, der Wärme, zunächst hervorgerufen werden. Endlich beherrscht die Schwerkraft alle Bewegungen in der Atmosphäre, indem sie ihre Kraft, welche niemals ruht, mit der Wirkung der anderen Naturkräfte vereinigt.

Kurz, es giebt keine irdische Erscheinung, bei welcher die Schwerkraft nicht in jedem Augenblicke mitwirkte, bald um das Gleichgewicht herzustellen, bald um Bewegung zu erzeugen. Selbst da wo sie zerstört oder aufgehoben scheint, wirkt sie unaufhörlich in gleicher Stärke fort, sodaß es kein Mittel giebt, ihren Einfluß zu vernichten.

§ 2. Die Schwere im Himmelsraume; allgemeine Massenanziehung.

Alle Erscheinungen, von denen wir im Vorstehenden ein Gesammtbild entworfen haben, entspringen aus ein und derselben Ursache, verdanken ihre Entstehung ein und derselben Kraft: welch letzteren Namen man für jede Ursache anwendet, welche im Stande ist einen Körper in Bewegung zu setzen, oder die Bewegung desselben abzuändern, oder endlich ihn in den Zustand des Gleichgewichts zurückzuführen.

Worin besteht nun im Wesentlichen diese Kraft? Diese Frage zu beantworten liegt außerhalb des Bereiches unserer Untersuchung: wir wollen uns darauf beschränken ihre Wirkung zu erforschen und die Gesetze aufzustellen, nach denen sie wirkt. Wir werden daher fragen müssen

Digitized by Google

in welcher Richtung sich ein Körper zu bewegen sucht und sich auch wirklich bewegt, wenn er auf keinen Widerstand trifft, ferner an welchem Punkte des Körpers diese Kraft ihre Wirkung ausübt, und endlich mit welcher Stärke sie jedes materielle Theilchen in Bewegung zu setzen versucht. Alle diese Fragen sind von der Wissenschaft vollständig gelöst.

Beschäftigen wir uns zuerst mit der Richtung der Schwerkraft.

Alle Körper fallen von oben nach unten, d. h. in der Richtung der senkrechten Linie des Ortes, und in derselben Richtung drücken sie auf ihre Unterlagen. Es scheint daher als wirke die Schwere aus dem Innern der Erde; und da bei kleinen Entfernungen alle senkrechten Linien parallel zu sein scheinen, so könnte man denken, daß an Stelle einer einzigen Kraft es eine unzählige Menge von Kräften gebe, welche alle in derselben Weise wirken. Allein es ist leicht zu zeigen, daß diese Schlußfolgerung nicht streng ist.

In der That wirkt die Schwere überall in derselben Weise. An allen Orten, unter allen Breiten, am Aequator, an den Polen, in zwischenliegenden Gegenden macht sie ihren Einfluß immer geltend in einer Richtung, welche auf der Horizontalebene senkrecht ist. Um zu wissen, in welchem Punkte des Innern der Erdkugel diese scheinbar vielfache Thätigkeit ihren Sitz hat, muß man fragen, ob sich alle diese senkrechten Linien in einem Punkte schneiden.

Nehmen wir irgend einen Meridian der Erdkugel, so wird jeder Theil dieses Kreises, als eine horizontale Linie genommen werden können, und es wird die Linie, welche auf diesem Kreisstücke senkrecht ist, nichts anderes sein, als ein Halbmesser des Kreises, d. h. eine Linie, welche im Kugelmittelpunkte endigt. Mithin sind alle diese Senkrechten, wie AZ, in Wirklichkeit convergirende Linien, trotzdem es scheint, als ob die nächst benachbarten parallel wären: sie alle sind nach dem Mittelpunkte C der Erde gerichtet (Fig. 2). Aus diesen Ueberlegungen folgt, daß die Begriffe Oben und Unten wohl eine lokale Bedeutung haben, daß man sie aber nicht allge-

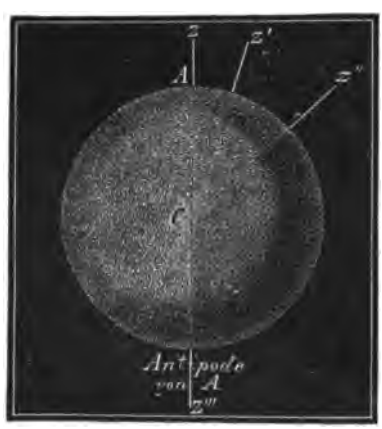


Fig. 2. Der Mittelpunkt der Erde als Endpunkt der Senkrechten.

Digitized by Google

mein auf das Erdganze übertragen darf. Diese Ueberlegung ist in früheren Jahrhunderten nicht zu vollständiger Klarheit gelangt; denn als Columbus auszog, um in der Richtung nach Westen steuernd einen Weg nach Indien zu finden, wurde ihm unter anderem eingewendet, daß es ihm wohl gelingen könnte auf der Erdkugel hinunter zu fahren, daß er aber kaum hoffen dürfte, den steilen Weg aufwärts wieder zurücklegen zu können. Man sieht, daß hierbei die Begriffe des Oben und Unten, wie sie für unseren Wohnort gelten, fälschlich auf das Erdganze übertragen worden waren.

Da die Erde nicht in aller Strenge eine Kugel ist, sondern da sie an beiden Polen eine Abplattung, rings um den Aequator dagegen eine Anschwellung besitzt, so laufen die Senkrechten in verschiedenen geographischen Breiten nicht genau in demselben Punkte zusammen, und es ist daher das obige Resultat nur eine erste Annäherung. Außer diesem Grunde der Abweichung wirken auch noch, wie wir sehen werden, lokale Unregelmäßigkeiten, welche die Bestimmung des wahren Anziehungspunktes der Schwerkraft sehr verwickelt machen. Für uns aber sind diese verschiedenen Abweichungen von keiner Wichtigkeit, und wir wollen Folgendes als erstes Grundgesetz aufstellen.

Alle schweren Körper streben nach dem Mittelpunkte der Erde. Die Schwerkraft wirkt auf sie wie eine einzige Kraft, welche von jenem Punkte ausgeht.

Für dieses Gesetz giebt es keine Ausnahme. Mögen sich die Körper an der Erdoberfläche oder in beliebiger Höhe im Luftraum befinden, oder mögen sie im Innern der Erdrinde, in den tiefsten Bergwerksschachten eingeschlossen sein, in jedem dieser Fälle, wird es durch die Beobachtung bestätigt.

Auch heut zu Tage ist die Vorstellung, daß die Richtungen, in denen die Körper fallen, nach einem Punkt hin convergiren, noch nicht so allgemein verbreitet, als man erwarten sollte. Wenn sich viele Leute vorstellen sollen, daß die Erde eine Kugel und doch an allen Punkten ihrer Oberfläche bewohnt ist, so können sie nicht begreifen, wie sich unsere Gegenfüßler aufrecht erhalten können, während ihre Füße nach oben, ihr Kopf nach unten gerichtet ist, und wie bei ihnen alle festen und flüssigen Körper im Gleichgewicht bleiben können. Bei genauerem Nachdenken würden sie bald einsehen, daß die Begriffe Oben und Unten nur relativ

Digitized by Google

Begriffe sind, daß auf einer Kugel, welche frei im Raume schwebt, alle Theile der Oberfläche mit gleichem Rechte als horizontal angesehen werden dürfen, und daß das Streben aller Körper nach dem Kugelmittelpunkte vollständig das Gleichgewicht auf der Oberfläche erklärt, auf welchem Theile der Oberfläche sich die Körper immer befinden mögen.

Woher rührt aber diese Centralkraft? Ist sie eine geheimnißvolle Eigenschaft, welche vom Stoffe unabhängig ist? Und besitzt vielleicht die Erde allein diese geheimnißvolle Macht?

Noch vor zwei Jahrhunderten blieben diese Fragen ohne Antwort. Damals gewährten die Versuche Galileis über den Fall schwerer Körper und Huyghen's tiefsinnige Forschungen über die Grundlehren der Mechanik einem Newton die Möglichkeit nachzuweisen, daß die Kraft, welche die Erscheinungen der Schwere an der Erdoberfläche bewirkt, dieselbe ist wie diejenige, welche im ganzen Weltenraume alle Sterne in ihren Bahnen erhält. Die Schwerkraft ist nur ein besonderer Fall der allgemeinen Massenanziehung. In Folge dieser Kraft ziehen sich je zwei Massentheilchen an, d. h. sie haben ein Streben, sich gegenseitig zu vereinigen, dessen Stärke von der Größe ihrer Massen und von ihrer Entfernung abhängt. Das Gesetz dieser Abhängigkeit läßt sich etwa folgendermaßen darstellen:

Nimmt man als Einheit die Kraft, welche zwei gleiche Massen, deren Abstand gleich der Längeneinheit ist, einander entgegentreibt, so wird diese Kraft selbst verdoppelt, sobald die eine der beiden Massen doppelte Größe erlangt; ersetzt man nun auch noch die andere Masse durch eine dreimal so große, so wird die Kraft von neuem verdreifacht, sodaß sie nunmehr sechs Mal so groß ist, als im Anfange.

Behält man nunmehr dieselben Massen bei, macht aber ihren Abstand nur halb, ein Drittel, ein Viertel so groß als zuvor, so wird dadurch die Anziehungskraft vier Mal, neun Mal, sechzehn Mal so groß.

Mithin ist die Massenanziehung dem Produkte der Massen proportional, ändert sich aber im umgekehrten Verhältnisse mit dem Quadrate*) ihrer Entfernungen.

Dies ist das Grundprincip, von welchem die Erscheinungen der

*) Das Quadrat einer Zahl erhält man bekanntlich dadurch, daß man sie mit sich selbst multiplicirt: so ist 9 das Quadrat von 3, 100 von 10, 1000000 von 1000 u. s. w.

Digitized by Google

Schwerkraft nur besondere Anwendungen darbieten. Es war keine leichte Aufgabe, aus ihm alle Folgerungen abzuleiten, die gegenseitigen Wirkungen aller der kleinen Massen aus denen die Gesammtmasse der Erde besteht, zu berechnen, und das Endresultat aller dieser vereinigten Wirkungen aufzufinden. Newton und nach ihm die großen Mathematiker, welche seine Ideen weiter ausgeführt haben, wie d'Alembert, Euler, Maclaurin, Lagrange, Laplace u. a. m. haben sich um die Lösung dieser Aufgabe bemüht. Sie haben gezeigt, daß eine Kugel, in welcher der Stoff gleichmäßig vertheilt ist, auf einen äußeren Punkt genau so wirkt, als ob der ganze Stoff in ihrem Mittelpunkte vereinigt wäre. Ebenso verhält sich eine kugelförmige Schicht von überall gleicher Dicke, und folglich auch eine Reihe solcher concentrischer Schichten, bei denen sich die Dichtigkeit nach einem bestimmten Gesetze ändert.

Dieser Fall tritt nun bei der Erde ein; und hieraus erklärt es sich, warum die Richtung der Schwere überall mit der Senkrechten auf der Oberfläche, oder mit der Linie, die den schweren Körper mit dem Kugelmittelpunkte verbindet, zusammenfällt.

Ein Punkt im Innern wird durch alle die Schichten, die dem Mittelpunkte näher liegen, angezogen, während sich die Anziehungen der Massentheilchen in den entfernteren Schichten gegenseitig aufheben, sodaß die Intensität der Schwerkraft von Außen nach Innen zu allmählich abnimmt*). In gleicher Weise verringert sich auch die Schwerkraft für äußere Körper in dem Maße, als ihr Abstand von der Oberfläche wächst.

Die Quelle für die Schwerkraft unserer Erdkugel ist also in der Anziehung der gesammten Masse, aus der sie besteht, zu suchen; und es giebt nicht ein einziges noch so kleines Theilchen, das nicht zu der allgemeinen Wirkung beitrüge. Wir können noch weiter gehen: in dem Augenblicke, in welchem ein fallender Stein dem Einfluß der Masse der Erdkugel Folge leistet, wirkt er selbst auf diese letztere durch seine eigene Masse. Die beiden Körper vereinigen sich indem sie sich gegenseitig an-

*) In Wirklichkeit nimmt die Schwerkraft von der Oberfläche an bis zu einem Abstande vom Mittelpunkte, den man auf ungefähr $^7/_{10}$ des Halbmessers schätzt, zu und vermindert sich dann bis zum Mittelpunkte. Dies rührt daher, daß die concentrischen Schichten, aus denen unsere Erde besteht, nicht von gleicher Dichtigkeit sind, sondern daß die Dichtigkeit von der Oberfläche an bis zum Innern zunimmt: an der Oberfläche beträgt die Dichtigkeit noch nicht $^2/_3$ der mittleren Dichtigkeit des Erdganzen. Diese Resultate sind durch Pendelbeobachtungen aufgefunden worden, von denen wir später sprechen werden.

Digitized by Google

ziehen: doch ist nur die Bewegung des Steines allein merklich, weil seine Masse der Erdmasse gegenüber vollständig verschwindet.

Wir haben gesagt, daß die Massenanziehung eine allgemeine ist: und in der That beherrscht sie nicht allein alle Erscheinungen der irdischen Schwere, sondern ihr Reich erstreckt sich bis in die entferntesten Tiefen der Welten. Erde und Mond ziehen sich gegenseitig an, und beide gemeinsam stehen wieder in derselben Wechselbeziehung mit der Sonne. Alle Planeten unsers Sonnensystems wirken beständig aufeinander ebenso wie auf die ungeheure Kugel, welche in ihrem gemeinsamen Brennpunkte glänzt. Diese letztere aber zwingt sie alle durch ihre ungeheure Masse in ihre Bahnen, sodaß die Bewegungen aller Himmelskörper unseres Systems sich ändern und gegenseitig regeln unter dem Einflusse derselben Kraft, die beständig in jeder ihrer Massen thätig ist.

In dem Werke über den Himmel*) haben wir versucht, die großartigen Aufgaben auseinander zu setzen, deren Lösung den Triumph der Wissenschaft bilden: hier wollen wir nur an zwei augenfällige Zeugnisse für das Vorhandensein der Schwerkraft in den Himmelsräumen erinnern. Ebbe und Fluth, diese periodischen Schwankungen des Meeres, werden durch die Anziehung der Massen des Mondes und der Sonne bewirkt; und auch die Meteorsteine, diese Himmelskörper im kleinsten Maßstabe, welche manchmal auf die Oberfläche unseres Planeten herabfallen, zeigen, daß die irdische Schwerkraft wohl im Stande ist, äußere Massen aus ihren Bahnen abzulenken. Endlich beweisen die neuesten Forschungen in der Astronomie, daß dieselbe Kraft auch die Bewegungen der entferntesten Sterne regelt. Die Doppelsterne sind Systeme von Sonnen, welche sich in ungeheuren Entfernungen von unserer Welt befinden, und welche wir gleichwohl sich um einander bewegen sehen; es ist mithin augenscheinlich, daß auch ihre gegenseitige Bewegung denselben Gesetzen folgt, welche die der Planeten beherrscht, und daß also auch bei ihnen dieselbe Massenanziehung besteht, die wir zuerst als Schwerkraft kennen gelernt haben.

*) Guillemin, le Ciel. (Paris, Hachette & Cie.) Deutsche Bearbeitung Verlag von O. Spamer in Leipzig.

Digitized by Google

Zweites Kapitel.

Gesetze der Schwerkraft.

§ 1. Der freie Fall der Körper. — Gleiche Geschwindigkeit beim Fall der Körper im leeren Raume.

Vor Galilei hatte man keine genauen Versuche über den Fall schwerer Körper, welche in der Luft oder anderen Mitteln frei fallengelassen wurden, angestellt. Da man nun sah, daß gewisse schwere Körper, wie die Metalle, wesentlich schneller fielen als leichtere Körper, so glaubte man, auf Aristoteles' Aussage hin, daß die Fallgeschwindigkeit für Körper, welche aus derselben Höhe herabfallen von ihrem Gewichte und der Beschaffenheit ihres Stoffes abhängig sei. Diesen Irrthum, den viele Leute vielleicht noch heute theilen, haben die Versuche, welche Galilei auf dem berühmten schiefen Thurme zu Pisa (Tafel I) anstellte, vollständig widerlegt. Indem er von der Spitze des Thurmes Kugeln aus verschiedenen Metallen, aus Gold, Kupfer, Blei, von gleichem Volumen, aber verschiedenem Gewichte, herabfallen ließ, zeigte er, daß sie alle den Erdboden fast zu gleicher Zeit erreichten: nur eine Kugel aus Wachs erlitt eine merkliche Verzögerung. Der Unterschied in der Zeit des Falles war durchaus nicht stark genug, sodaß man ihn aus der Verschiedenheit der Gewichte hätte erklären können; denn wenn die Geschwindigkeit vom Gewichte abhängig wäre, so hätte ein doppelt so schwerer Körper auch doppelt so schnell fallen müssen, was sich aber durch den Versuch durchaus nicht bestätigte. Indem er nun dieselben Versuche in der Luft und im Wasser wiederholte, zeigte er, daß der Unterschied in den Zeiten, welche die Kugeln zum Herabfallen gebrauchten, der verschiedenen Dichtigkeit der Mittel und nicht der Verschiedenheit der Masse der herabfallenden Körper entsprachen. Hieraus schloß Galilei, daß der Widerstand der Luft der wahre Grund für die beobachteten Unterschiede sei.

Läßt man einen Körper in der Luft oder in irgend einem anderen Mittel fallen, so muß derselbe in jedem Augenblicke die Theilchen, aus denen dieses Mittel besteht, verdrängen, was nur geschehen kann, wenn er ihnen einen Theil seiner eigenen Bewegung mittheilt. Stellt man daher den Versuch gleichzeitig mit einer Bleikugel und einer Kugel aus

Digitized by Google

Korkholz von gleichem Volumen an, so vertheilt sich der Widerstand der Luft, welcher für beide Oberflächen derselbe ist, beim Blei auf eine viel größere Menge von Gewichtstheilchen, als beim Kork: mithin muß die Verminderung der Geschwindigkeit bei der leichteren Kugel größer sein. Der Unterschied würde noch viel merklicher sein, wenn man die Körper in einem dichteren Mittel statt in der Luft fallen ließe.

Galilei's Behauptung, daß die Verschiedenheit der Fallgeschwindigkeit nur durch den Widerstand des Mittels, in welchem der Fall erfolgt, verursacht wird, läßt sich durch einen Versuch, den Newton angegeben hat, in aller Strenge bestätigen.

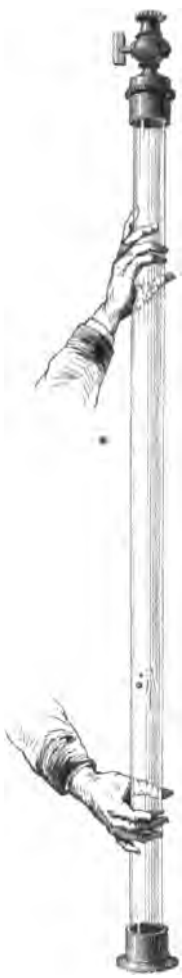


Fig. 3. Versuch, welcher zeigt, daß im leeren Raume alle Körper mit gleicher Geschwindigkeit fallen.

Man nimmt eine lange Glasröhre, die an beiden Enden durch Messingdeckel geschlossen ist, von denen der eine luftdicht schließt, während der andere in eine, durch einen Hahn verschließbare, Röhre endigt, die auf einer Luftpumpe aufgeschraubt werden kann. Man bringt in das Innere der Röhre Körper von verschiedener Dichtigkeit, Metallstücke, Holz, Federn, Papier, Kork u. dergl. und entfernt hierauf durch die Pumpe die Luft. Kehrt man nun plötzlich die Röhre um und giebt ihr eine aufrechte Stellung, so fallen alle die kleinen Körper in der Richtung der Axe des Cylinders gleichzeitig vom oberen Ende bis auf den Grund (Fig. 3). Wenn man dagegen die Röhre umkehrt, während sie noch Luft enthält, so zeigt sich ein Unterschied der Geschwindigkeit, in der Weise, daß die schwersten Körper am schnellsten, die leichtesten am langsamsten fallen. Wiederholt man den Versuch mehrere Male, indem man nach und nach die Luft aus der Röhre pumpt, so sieht man, daß diese Ungleichheit in demselben Maße abnimmt, in welchem das Mittel, worin der Fall erfolgt, dünner wird. Ist die Luftverdünnung so weit als möglich getrieben, so treffen alle Körper, welche sehr verschiedene Dichtigkeit besitzen, gleichzeitig auf den unteren Deckel der Röhre.

Hieraus folgt, daß der Widerstand des Mittels

Digitized by Google

Ursache ist für die ungleiche Geschwindigkeit beim Falle von Körpern welche eine größere oder geringere Dichtigkeit besitzen. Dieser Widerstand verzögert nicht allein die Bewegungen, sondern verursacht auch Abweichungen in der Fallrichtung leichter Körper. Läßt man ein Blatt Papier in der Luft fallen, so beschreibt es eine oft sehr unregelmäßig verschlungene Bahn, ehe es den Boden erreicht. Läßt man ein Geldstück und eine kleine Papierscheibe von derselben Größe jedes für sich allein aus derselben Höhe herabfallen, so wird das Geldstück den Boden viel eher berühren, als das Papier: legt man aber das Stück Papier auf das Geldstück und läßt beide zusammen fallen, so treffen sie gleichzeitig auf den Boden. In diesem Falle hat nämlich das Geldstück dem Papierblatte den Weg durch die Luft gebahnt.

Was wir von den festen Körpern gesagt haben, gilt in gleicher Weise für die flüssigen und luftförmigen. Wenn eine Wassermasse herabfällt, so theilt sie sich in eine Menge Tropfen und endlich in feinen Staub in Folge des Widerstandes der Luft und der Beweglichkeit ihrer Theile. Besonders auffallend ist diese Theilung bei den natürlichen Wasserfällen, wo das Wasser aus sehr großer Höhe herabfällt, wie beim Staubbachfall, der daher seinen Namen trägt. Läßt man dagegen Wasser im Innern einer Röhre fallen, welche man luftleer gepumpt hat, so fällt es als zusammenhängende Masse auf den Boden der Röhre, behält dabei die cylindrische Form des Gefäßes bei und bringt beim Auftreffen einen eben solchen Ton hervor wie ein trockner fester Körper.

Ebenso stürzt Rauch, der in einer ähnlichen Röhre eingeschlossen ist, herab, wenn man dieselbe luftleer macht, woraus man schon sieht, daß auch die Luftarten der Schwerkraft unterworfen sind.

Beiläufig wollen wir erwähnen, daß der Widerstand, den die Luft dem Falle der Körper entgegenstellt, für den Ackerbau sehr wichtig ist, welcher ja ohnedies schon gar zu viel von den Verwüstungen leidet, die der Hagel anrichtet. Ohne diesen Widerstand würden die kleinsten Regentropfen, wenn sie mit immer steigender Geschwindigkeit hoch aus den Wolken herabfielen, die Oberfläche des Bodens mit großer Kraft treffen und dadurch großen Schaden anrichten.

Somit haben wir ein erstes Gesetz für die Wirkung der Schwerkraft nachgewiesen:

Alle Körper an der Oberfläche der Erde fallen im

Digitized by Google

luftleeren Raume mit gleicher Geschwindigkeit, welche von der Größe eines Volumens und der Masse derselben vollständig unabhängig ist.

Hieraus zieht man unmittelbar die wichtige Folgerung, daß die Schwerkraft auf alle Massentheilchen mit gleicher Stärke wirkt, gerade als ob jedes der Theilchen, aus welchem ein Körper besteht, für sich allein im Raume und selbständig wäre. Man darf die Schwerkraft aber nicht mit dem Gewichte der Körper verwechseln. Wenn wir sehen, daß die Schwerkraft in gleicher Weise auf alle Körper wirkt, mag auch das Volumen und die Beschaffenheit des Stoffes desselben noch so verschieden sein, so gilt dies durchaus nicht für das Gewicht der Körper. Unter diesem letzteren können wir die Summe aller einzelnen Wirkungen der Schwerkraft auf die einzelnen Theilchen des Körpers verstehen: das Gewicht ändert sich also mit dem Volumen bei gleichartigen Körpern, die aus demselben Stoff bestehen, oder auch bei gleichem Volumen mit der Dichtigkeit, bis zu welcher der Stoff in den einzelnen Körpern zusammengedrängt ist.

§ 2. Fall der Körper. — Richtung des Falles.

Die Richtung der Schwerkraft fällt überall, wie wir bereits gesehen haben, mit der Richtung der Vertikalen oder einer geraden Linie, welche auf der Ebene des Horizontes senkrecht steht, zusammen. Diese Ebene selbst aber wird durch die Oberfläche des ruhenden Wassers bestimmt. Ein sehr einfaches Mittel, um diese Richtung zu bestimmen, besteht darin, daß man ein Gewicht an einem feinen Faden befestigt und die Richtung dieses Fadens beobachtet, wenn derselbe nach einigen Schwingungen zur Ruhe gekommen ist. Dieses Instrument, dessen sich alle Handwerker bedienen, die irgend einen Gegenstand senkrecht aufrichten wollen, heißt Bleiloth. Hängt man das Bleiloth über einer ruhenden flüssigen Masse auf, z. B. über einem Quecksilberbade, so überzeugt man sich leicht mit Hilfe eines zweiten Bleiloth es, welches man in der Hand hält, daß die Richtung des Fadens und die seines Spiegelbildes in eine gerade Linie fallen (Fig. 4.), und daß folglich nach den Gesetzen über die Spiegelung des Lichtes beide auf der Oberfläche der Flüssigkeit senkrecht stehen.

Digitized by Google

Wie wir bereits erwähnt haben, sind diese verschiedenen Senkrechten unter sich nicht parallel; bei kleinen Entfernungen aber ist der Winkel, den sie bilden, so gering, daß er sich fast der Messung entzieht. Im Mittel bilden die Senkrechten an zwei Punkten, die um 31 Meter von einander abstehen, nur einen Winkel von einer Secunde (1″), und dies

Fig. 4. Die Richtung der Schwere ist senkrecht auf der Oberfläche ruhender Flüssigkeiten.

ist eine Größe, welche die Astronomen und Geodäten nur mit den feinsten Instrumenten bestimmen können. Nimmt man die Punkte der Erde immer weiter und weiter von einander entfernt, so durchläuft der Winkel der Senkrechten alle Werthe von 0° bis 180°. Liegen die beiden Standpunkte auf demselben Meridian, so daß sie dieselbe geographische Länge haben, so ist dieser Winkel gleich dem Unterschiede in der Breite: So findet man z. B. den Winkel zwischen den Richtungen der Schwere zu Paris und Dünkirchen ungefähr gleich 2° 12′*). Hieraus ergiebt sich,

*) Wird der Versuch in der Nähe eines sehr hohen Berges angestellt, so weicht das Bleiloth infolge der Anziehung, die die Masse des Berges darauf ausübt, von der senkrechten Richtung ab. Diese Abweichung, welche stets sehr klein ist, wurde zuerst am Abhange

Digitized by Google

daß die Oberflächen der Seen und Meere nicht genaue Ebenen sein können, sondern daß sie die Form einer Kugel, oder noch genauer eines Sphäroides annehmen müssen, da jeder Theil ihrer Oberfläche genau mit der Horizontalfläche des Ortes zusammenfallen muß. Nunmehr wird es klar sein, in wie weit man berechtigt ist zu sagen, daß alle schweren Körper in derselben, nämlich der senkrechten, Richtung fallen: nur bei sehr großer Nähe darf man wirklich davon sprechen, daß die Fallrichtungen parallel sind.

Endlich bewirkt auch noch die Axendrehung der Erde eine Abweichung in der Fallrichtung. Ließe man vom Punkte a aus einer gewissen Höhe über der Erde einen Körper herabfallen, so müßte derselbe auf dem senkrecht darunter liegenden Punkt A treffen, wenn sich die Erde nicht bewegte (Fig. 5). Nun beschreibt aber in der Zeit, daß der Körper fällt, der Punkt a infolge der Drehung der Erde den Bogen aa', während der Fußpunkt gleichzeitig nur den kleineren Bogen AA zurücklegt. Da also der Körper in dem Augenblicke, wo er frei gelassen wird, eine größere Rotationsgeschwindigkeit besitzt, als A, und dieselbe auch während des Falles beibehalten muß, so wird er nicht im Punkte A, sondern in einem weiter östlich gelegenen Punkte A' niederfallen. Diese Abweichung muß an den Polen, wo die Drehungsgeschwindigkeit gleich Null

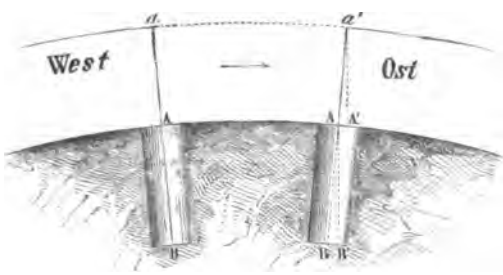


Fig. 5. Oestliche Abweichung frei fallender Körper.

ist, verschwinden, von da an aber bis zum Aequator zunehmen. Die Richtigkeit dieser Theorie wurde zuerst durch Versuche bestätigt, die Benzenberg im Michaelisthurme zu Hamburg anstellte. Da aber die

des Chimborazo durch Bouguer und Condamine bestimmt. Im Jahre 1774 maßen Maskelyne und Hutton den Winkel, den zwei Lothe bildeten, die nördlich und südlich vom Berge Shehallien aufgestellt waren, und fanden die Größe desselben gleich 53", während infolge der Entfernung der beiden Standpunkte sich nur 41" hätten ergeben sollen: die Abweichung von 12" war mithin durch die Anziehung des Berges verursacht worden.

Digitized by Google

Genauigkeit durch den Luftzug in einem freistehenden Bauwerk leicht gestört wird, so wiederholte Reich die Versuche in einem tiefen Schachte des Freiberger Bergwerkes. Ließ er Metallkugeln vom Punkte A aus am oberen Ende des tiefen Schachtes fallen, so trafen dieselben nicht auf den Punkt B, der durch ein Bleiloth als der senkrecht unter A liegende Punkt gefunden war, sondern auf A', welcher bei einer Tiefe von 158,5 m vom Punkte A um 28 mm weiter nach Osten lag. Die Versuche stimmten mit dem theoretisch entwickelten Werthe von 26,6 mm vollkommen genügend überein. Am Aequator wird die Abweichung auf 100 m Höhe 33 mm betragen. Man sieht, daß dieser Versuch zugleich ein directer Beweis für die Axendrehung der Erde ist.

§ 3. Fall der Körper. — Galilei's Gesetze.

Galilei beschränkte sich bei seinen Untersuchungen über den Fall der Körper nicht darauf, das Vorurtheil zu zerstören, welches noch zu seiner Zeit über die Ungleichheit der Geschwindigkeit als Folge der Verschiedenheit der Gewichte oder der Dichtigkeit der Stoffe herrschte. Er beobachtete, daß die Geschwindigkeit größer wurde, wenn die Körper aus einer größeren Höhe herabfielen, und daß die Räume, welche die Körper in einer gewissen Zeit durchlaufen, zu dieser Zeit nicht im einfachen Verhältnisse stehen: mit anderen Worten, daß die Bewegung der frei fallenden Körper nicht eine gleichförmige, sondern eine beschleunigte ist. Im Allgemeinen war diese Beobachtuug wahrscheinlich schon vor ihm gemacht worden, ihm aber gebührt das Verdienst, die genauen Gesetze der Veränderung der Geschwindigkeit und des Wachsens der Fallräume aufgefunden zu haben. Indem er voraussetzte, daß die anziehende Kraft der Schwere in jedem Augenblicke dieselbe Größe beibehält, so schloß er daraus, daß die Geschwindigkeit mit der Zeit gleichmäßig wachsen müsse, und bestätigte diese Behauptung durch einen berühmten Versuch, der noch heute mit dem Namen seines Erfinders bezeichnet wird; wir meinen den Galilei'schen Versuch über den Fall auf der schiefen Ebene.

Fällt eine Metallkugel oder ein anderer schwerer Körper frei herab, so ist die Bewegung so schnell, daß es unmöglich ist zu bestimmen, in welchem Punkte sich der Körper in jedem Augenblicke befindet: läßt man

Digitized by Google

ihn dagegen auf einer schiefen Ebene herabrollen, so kann man leicht die Wege messen, welche er in den einzelnen aufeinander folgenden Secunden durchläuft. Dabei kommen, abgesehen von der Richtung auf der Ebene einerseits, und dem Widerstande der Luft andererseits, dieselben Gesetze zur Geltung, wie bei dem freien Falle. Denn auch auf der schiefen Ebene wird der Körper durch die ununterbrochen wirkende Schwerkraft herabgetrieben, nur daß dieselbe im Verhältnisse der Linien AC und AB (Fig. 6) zu verringern ist. Der Apparat, dessen sich Galilei zu diesen Versuchen bediente, bestand in einem sehr glatten Seile, das durch ein Gewicht gespannt war und die Stelle der schiefen Ebene vertrat, und einem Wagen, der aus zwei Rädern gebildet war, die durch ein Gegengewicht aufrecht erhalten wurden.

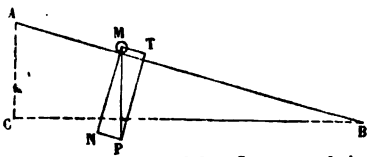


Fig. 6. Bewegung fester Körper auf einer schiefen Ebene.

So wichtig diese Versuche auch für die Entwickelung der Theorie gewesen sind, so kann man sich doch jetzt mit denselben nicht mehr begnügen, da die Fehler, die durch die Reibung und die Ungenauigkeit der Ablesung bewirkt werden, eine zu bedeutende Größe erreichen: man wendet daher zu demselben Zwecke jetzt andere Apparate an, die in keinem physikalischen Cabinete fehlen; und die wir jetzt besprechen wollen. Zuvor sei noch erwähnt, daß Galilei's Resultate schon im siebzehnten Jahrhunderte durch Riccioli und Grimaldi bestätigt wurden, indem dieselben von verschiedenen Thürmen Körper herabfallen ließen und die Zeiten bestimmten, die zum Falle erforderlich waren; auch ersann 1699 P. Sebastian eine Maschine, durch welche dasselbe erreicht werden sollte. Der erste Apparat aber, welcher brauchbare Resultate lieferte, ist die vom englischen Physiker Atwood erfundene Fallmaschine; und endlich hat in neuerer Zeit General Morin eine Maschine ersonnen, bei welcher die Beobachtungsresultate direct durch den Apparat selbst aufgezeichnet werden. Beide Apparate wollen wir jetzt unseren Lesern vorführen.

Der Kunstgriff, den Atwood anwendet, um die Fallbewegung zu verzögern, besteht in Folgendem: um den Rand einer sehr leicht beweglichen Rolle (Fig. 7) ist ein sehr feiner Seidenfaden geschlungen, der an beiden Enden zwei Metallcylinder von genau gleichem Gewichte trägt, sodaß Rolle, Faden und Gewichte in Ruhe bleiben, so lange man nicht auf

Digitized by Google

der einen Seite ein Zusatzgewicht hinzufügt. Belastet man aber den einen der beiden Körper durch ein kleines Uebergewicht, so wird der Apparat in Bewegung gerathen; es wird das überlastete Gewicht in senkrechter Richtung herabsinken, das andere aber aufsteigen. Die Geschwindigkeit wird dabei eine um so geringere sein, je kleiner das Zusatzgewicht

Fig. 7. Räderwerk der Atwood'schen Fallmaschine.

im Verhältnisse zu der Summe der beiden ursprünglichen Gewichte ist. Nehmen wir z. B. an, daß jedes derselben 12 gr., das Zusatzgewicht aber nur 1 gr. betrage, so wird die Gesammtlast von 25 gr. durch eine Kraft, die nur ihren fünfundzwanzigsten Theil beträgt, in Bewegung gesetzt: es wird also die Geschwindigkeit in demselben Maße verringert, als ob die Schwerkraft nur den fünfundzwanzigsten Theil ihrer wahren Größe besäße. Auf diese Weise läßt sich die Beobachtung leicht ausführen, ohne daß die Gesetze der Bewegung geändert sind.

Aus Figur 8 ist die Einrichtung der Maschine deutlich zu ersehen: man sieht dort am oberen Ende einer Säule die Rolle, deren Axe zwischen den Rändern von zwei Systemen von parallelen Rädern liegt, und um welche der Faden geschlungen ist, der an beiden Enden durch gleiche

Digitized by Google

Gewichte geſpannt wird. Hinter dem einen Gewichte befindet ſich ein ſorgfältig getheilter, aufrechter Maßſtab, auf welchem man in jedem

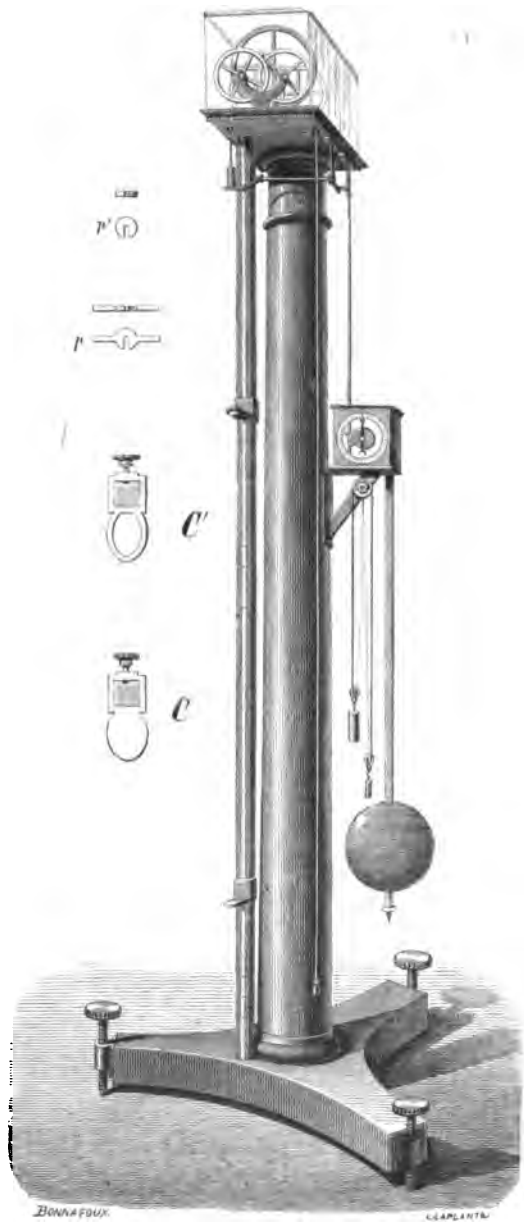


Fig. 8. Freier Fall der Körper. Atwood'ſche Fallmaſchine.

Augenblicke die Entfernung des Gewichtes vom Nullpunkte der Scala oder vom Ausgangspunkte der Bewegung ableſen kann.

Digitized by Google

Dieser Maßstab trägt zwei verstellbare Schieber, die man auf einen beliebigen Punkt der Theilung einstellen kann. Der untere Schieber C trägt eine volle Platte, welche dazu dient, das herabfallende Gewicht an einer beliebigen Stelle der Scala aufzuhalten; der obere Schieber C' dagegen besitzt die Form eines Ringes von solcher Weite, daß das am Faden hängende Gewicht mit dem Zusatzgewichte p' frei hindurchgleiten kann, während dagegen das Zusatzgewicht p wegen seiner verlängerten Form auf ihm liegen bleibt. Mit dem Apparate ist eine Uhr verbunden, welche die Secunden durch scharfe Schläge markirt, sodaß man sie bequem zählen kann, ohne das Zifferblatt anzusehen. Außerdem ist noch ein Mechanismus mit dem Uhrwerk verbunden, durch welchen das herabfallende Gewicht gerade in dem Augenblicke ausgelöst wird, wo sich der Secundenzeiger auf dem Nullpunkte des Zifferblattes befindet. In diesem Augenblicke wird die Stütze, welche den durch ein Uebergewicht beschwerten Metallcylinder trug, entfernt und seine Bewegung beginnt.

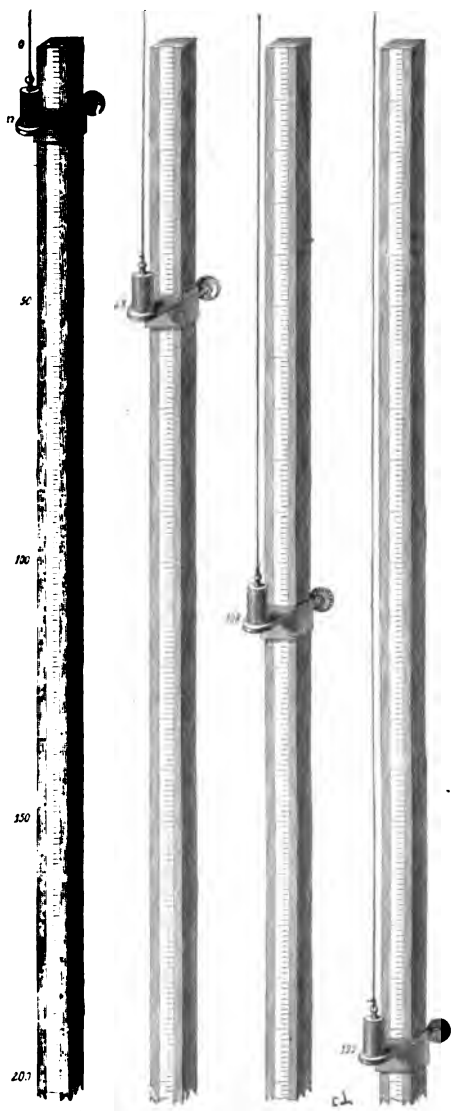


Fig. 9. Freier Fall der Körper. Gesetz der Fallräume.

Man kann nun diese Versuche auf folgende Weise anstellen. Zuerst befestigt man den nicht durchbrochenen Schieber so, daß der Cylinder, welchem das Uebergewicht p' zugefügt ist, gerade in dem Augenblick auf ihn trifft, wo die Secundenuhr den Anfang der zweiten Secunde markirt, was nach einigen Probiren leicht erreicht wird, und notirt den

Digitized by Google

Theilstrich, bei welchem sich der Schieber nunmehr befindet. Wir wollen annehmen, daß wir den Schieber auf den zwölften Theilstrich des Maßstabes (Fig. 9) hätten einstellen müssen. Hierauf probirt man ebenso aus, bis zu welchem Theilstrich das Gewicht zu Anfang der dritten Secunde, also nach Verlauf von zwei Secunden gelangt ist, und wird im vorliegenden Beispiele den 48. Theilstrich finden, ebenso für 3 Secunden den 108., für 4 den 192., für 5 den 300. Es sind mithin folgende Räume durchlaufen

Nach	1	Secunde	12 cm.
„	2	„	48 = 12 × 4
„	3	„	108 = 12 × 9
„	4	„	192 = 12 × 16
„	5	„	300 = 12 × 25 u. s. w.

Hieraus sieht man, daß man den Weg, den ein fallender Körper in der ersten Secunde durchläuft, mit den Zahlen 4, 9, 16, 25, multipliciren muß, um die Höhe zu finden, aus welcher er nach 2, 3, 4, 5 Secunden herabgefallen ist. Wenn man ein anderes Zusatzgewicht auflegt, so findet man zwar für die Wege andere Zahlen, das Verhältniß derselben ist aber wieder dasselbe. Hieraus ergiebt sich also für den freien Fall folgendes erstes Gesetz, welches Galilei durch die Versuche mit der schiefen Ebene gefunden hat:

Der Raum, welchen ein Körper durchläuft, der unter dem Einflusse der Schwerkraft frei herabfällt, wächst proportional mit dem Quadrate der Zeit, welche vom Anfang der Bewegung an verflossen ist.

Weiter ist es möglich, mit Hülfe des vorstehenden Apparates das Gesetz aufzufinden, nach welchem die Geschwindigkeit des freifallenden Körpers wächst, oder mit anderen Worten zu bestimmen, welche Geschwindigkeit der Körper erlangt hat, nachdem er 1, 2, 3 Secunden u. s. w. gefallen ist. So lange der Körper der Schwerkraft unterworfen ist, wächst diese Geschwindigkeit beständig, und läßt sich daher nicht beobachten. Will man also die Bestimmung ausführen, so ist es nothwendig, daß der Einfluß der Schwerkraft plötzlich beim Beginne einer neuen Secunde aufgehoben werde, ohne daß der Körper zur Ruhe gelangt: er wird sich dann gleichmäßig mit der Geschwindigkeit die er einmal erlangt hat fortbewegen.

Digitized by Google

Hier muß man sich wohl vergegenwärtigen, was man sich unter der Geschwindigkeit eines Körpers, der frei fällt oder allgemein eine beschleunigte Bewegung besitzt, vorzustellen hat. Denkt man sich, daß der Einfluß der treibenden Kraft plötzlich aufhöre und daß sich folglich die Bewegung nicht weiter beschleunige, so würde der Körper in jeder neuen Secunde gleichmäßig immer wieder denselben Weg zurücklegen: und diesen Weg nennt man seine Geschwindigkeit. Mit Hilfe des ringförmigen Schiebers der Atwood'schen Maschine läßt sich dieser Satz experimentell bestätigen. Befestigt man diesen Schieber an einem der Theilstriche, welche im vorigen Versuche gefunden worden waren, und benutzt man als Zusatzgewicht das mit Flügeln versehene Gewicht p, welches dem Gewichte p' gleich ist, so kann man wieder durch Probiren die Punkte auffinden, bis zu welchen der von seinem Uebergewicht durch den Ring befreite Cylinder zu Ende jeder einzelnen Secunde anlangt.

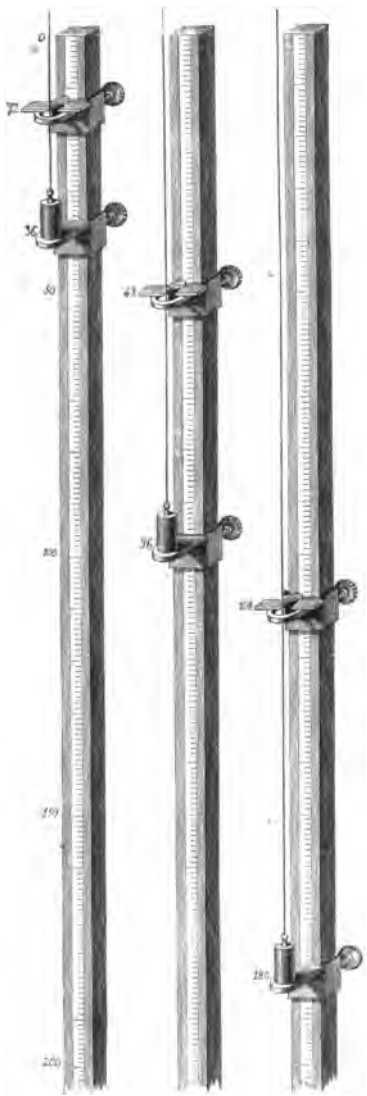


Fig. 10. Freier Fall der Körper. Gesetz der Geschwindigkeiten.

Stellt man den ringförmigen Schieber auf 12 cm., so gelangt das Gewicht zu Ende der nächsten Secunde bis 36 cm.; befindet sich der Ring bei 48 cm., so gelangt das Gewicht bis zu 96 cm., ebenso von 108 bis 180 cm. u. s. w. (S. Fig. 10). Hieraus ergeben sich die Geschwindigkeiten, welche der Körper in den einzelnen Secunden erlangt, folgendermaßen:

Nach	1	Sec. . . . . 24 cm.
„	2	„ 48 „
„	3	„ 72 „ u. s. w.

Digitized by Google

Man sieht, daß die Geschwindigkeit im Verhältniß der Zeit wächst, und kann daher ein zweites Gesetz für den freien Fall der Körper aufstellen: wenn ein Körper unter dem Einflusse der Schwerkraft frei fällt, so wächst seine Geschwindigkeit beständig; sie ist in jedem Augenblicke proportional der ganzen Zeit, welche vom Anfang der Bewegung an verflossen ist.

Aus denselben Versuchen geht weiter hervor, daß die Geschwindigkeit zu Ende der ersten Secunde doppelt so groß ist, als der Fallraum, welchen der Körper in dieser Zeit zurückgelegt hat; dasselbe würde sich ergeben, wenn man einen anderen Zeitraum, als die Secunde, als Zeiteinheit wählte.

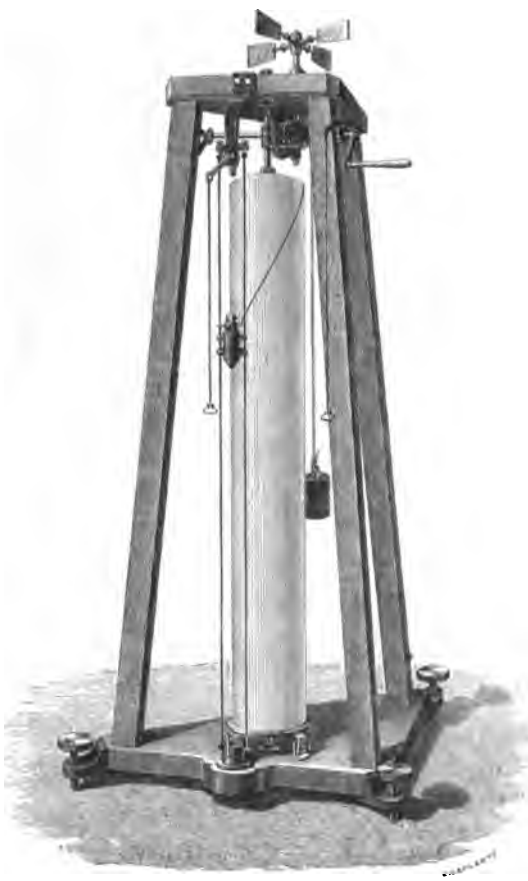


Fig. 11. Freier Fall der Körper. Fallmaschine nach Morin.

Dieselben Gesetze werden auch durch Versuche mit einer Maschine bestätigt, welche nach Vorschlägen, die zuerst Poncelet gemacht hat, von Morin ausgeführt worden ist und welche in ihrer Gesammtheit in Fig. 12 dargestellt ist. Bei derselben fällt ein cylindrisches Gewicht, das unten spitz zuläuft, zwischen zwei aufrechten Stäben frei herab und zieht beim Fallen mit einem Bleistift, welchen es trägt, einen Strich auf einer Säule, welche mit Papier überklebt ist.

Wäre die Säule unbeweglich, so würde der Bleistift beim Falle eine senkrechte Gerade ziehen, aus der sich kein Schluß auf die Tiefe des Falles in jeder Secunde ziehen ließe. Nun bewegt sich aber die Säule gleichmäßig

Digitized by Google

um ihre Axe mit Hilfe eines Räderwerkes, das durch ein Gewicht getrieben und durch einen Windflügel in gleichmäßiger Geschwindkeit erhalten wird. Infolge dieser Bewegung beschreibt nun der Bleistift eine krumme Linie, deren Gestalt die Gesetze des Falles erkennen läßt.

Rollt man nämlich das Papier auseinander, so findet man auf demselben eine Linie verzeichnet, welche man in der Geometrie als Parabel bezeichnet, und welche folgende Grundeigenschaft besitzt:

Legt man durch ihren höchsten Punkt, den Scheitel, eine senkrechte Linie, die sogenannte Axe der Parabel, und eine wagerechte Linie und fällt man auf beide von beliebigen Punkten der Parabel Lothe, so verhalten sich die Lothe, die der Axe parallel sind, wie die Quadrate der Lothe, die auf der Axe senkrecht stehen. Trägt man z. B. vom Scheitel O aus auf die horizontale Linie fünf gleiche Theile auf, so werden sich die Entfernungen der Theilpunkte von O wie die Zahlen 1, 2, 3, 4, 5 verhalten; dagegen verhalten sich die Linien, welche von den Theilpunkten aus parallel zur Axe bis an die Parabel gezogen sind, wie die Zahlen 1, 4, 9, 16, 25, d. h. wie die Quadrate der obigen Zahlen.

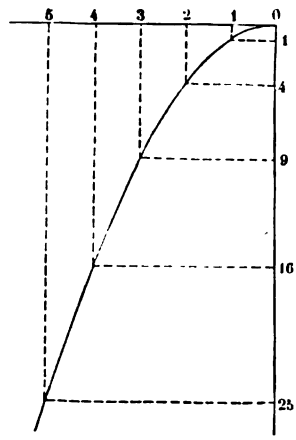


Fig. 12. Parabel, welche durch das Gewicht beim Falle verzeichnet wird.

Da sich nun die Säule gleichförmig um ihre Axe dreht, so stellen die gleichen Abschnitte auf der Horizontallinie zwischen je zwei aufeinanderfolgenden Theilpunkten gleiche Zeitabschnitte dar, die senkrechten Linien dagegen sind die Wege, welche der freifallende Körper zu Ende jedes Zeitabschnittes durchlaufen hat. Es ist also auch hierdurch das erste der vorstehenden Gesetze bestätigt; das zweite aber läßt sich aus diesem ableiten.

Man darf nicht glauben, daß die eben beschriebenen Maschinen absolut genaue Resultate ergeben: dazu giebt es noch zu viele störende Ursachen, wie die Reibung, der Widerstand der Luft u. dergl.; allein die Ungleichheiten, die man findet, sind so gering, daß man wohl das Recht hat, von dem Experimente auf die Richtigkeit der Theorie zu schließen.

Die Versuche mit der Atwood'schen Maschine beweisen zugleich auch,

Digitized by Google

daß die Schwerkraft auf einen fallenden Körper beständig in gleicher Stärke wirkt; denn da die Räume, welche der Körper in den einzelnen auf einander folgenden Secunden durchläuft, sich wie die ungeraden Zahlen 1, 3, 5, 7, 9, u. s. w., die zu Ende jeder einzelnen Secunde erlangten Geschwindigkeiten aber wie die geraden Zahlen 2, 4, 6, 8, 10, u. s. w. verhalten, so sieht man, daß jede dieser Geschwindigkeiten immer um denselben Werth größer ist, als der in der nächst vorhergehenden Secunde durchlaufene Weg. Diese constante Differenz, welche gleich dem Fallraum in der ersten Secunde ist, ist nun ein Maß für die beständig anhaltende Wirkung der Schwerkraft, welche im Verein mit der bereits erlangten Geschwindigkeit die beobachteten Wirkungen herbeiführt.

Wirft man einen Körper senkrecht nach oben, so steigt derselbe infolge des erhaltenen Impulses bis zu einer gewissen Höhe auf, die um so größer ist, je stärker der Stoß war, der dem Körper ertheilt wurde. Hierbei vermindert sich seine Geschwindigkeit beständig. Ist er nun an seinem höchsten Punkte angelangt, so beginnt er wieder mit steigender Geschwindigkeit herabzufallen; und zwar ist die Geschwindigkeit, die er in jedem einzelnen Punkte erlangt, genau so groß wie die, welche er beim Aufsteigen an derselben Stelle besaß.

Die Versuche, welche mit Hülfe von Galilei's schiefer Ebene und Atwood's Fallmaschine angestellt werden, beruhen darauf, daß die Stärke der Schwerkraft und damit die Geschwindigkeit künstlich vermindert werden, ohne daß sich dabei die Gesetze ihres Falles verändern. Wegen dieser Verringerung der wirkenden Kraft und dann auch wegen des störenden Einflusses der Reibung und des Widerstandes der Luft gestatten sie nicht die Ermittelung der Größe, um welche ein Körper im luftleeren Raume in bestimmter Zeit herabfallen würde; auch Morin's Versuche geben noch nicht diese Größe genau, da auch sie durch dieselben störenden Ursachen getrübt werden. Welche Methode man anwenden muß, um die Größe des freien Falles genau zu finden, werden wir später sehen.

Weiter ist die Stärke der Schwerkraft nicht für alle Punkte der Erdoberfläche dieselbe, sondern sie ändert sich mit der geographischen Breite, ja sie ist sogar von der lokalen Gestaltung der Erdrinde abhängig. Auch wenn wir einen Standpunkt hoch über der Erdoberfläche oder in bedeutender Tiefe im Innern der Erdrinde einnehmen, finden wir Werthe der Schwerkraft, die von denen an der Oberfläche abweichen.

Digitized by Google

Wenn wir daher jetzt bestimmte Zahlenwerthe einführen, so darf man nicht vergessen, daß diese Werthe nur für den Fall im luftleeren Raume, für Versuche, die ganz in der Nähe der Erdoberfläche angestellt werden, und für einen bestimmten Beobachtungsort, z. B. für die Sternwarte von Paris, worauf wir die Zahlen beziehen wollen, Gültigkeit besitzen.

Unter vorstehenden Bedingungen würde ein Körper in der ersten Secunde einen Raum von $4{,}9047^{m}$ durchlaufen, und folglich zu Ende der Secunde eine Geschwindigkeit von $9{,}8094^{m}$ erlangt haben. Diese letztere Zahl heißt seine Beschleunigung und dient als Maß für die Schwerkraft.

Nach 2 Sec. wird er einen Weg zurückgelegt haben von $19{,}619^{m}$
„ 3 „ „ „ „ „ „ „ „ „ „ $44{,}142$
„ 4 „ „ „ „ „ „ „ „ „ „ $78{,}475$
„ 5 „ „ „ „ „ „ „ „ „ „ $122{,}618$

In ähnlicher Weise könnte man die Zeit berechnen, welche ein Körper gebraucht, um aus einer bestimmten Höhe herabzufallen, sowie die Geschwindigkeit, mit welcher er am Erdboden anlangt. Man wird z. B. folgende zusammengehörige Werthe finden:

Fallhöhe. Meter	Fallzeit. Secunden	Erlangte Geschwindigkeit. Meter
1	0,45	4,429
2	0,64	6,264
3	0,78	7,672
4	0,90	8,858
5	1,01	9,904
10	1,43	14,006
100	4,51	44,293

Um also aus einer Höhe von 100^{m} herabzufallen, würde ein Körper etwas mehr, als $4\frac{1}{2}$ Sec. gebrauchen, dabei aber eine Geschwindigkeit von $44{,}293^{m}$ erlangen. Umgekehrt, wollte man einen Körper bis zur Höhe von 100^{m} aufwärts werfen, so müßte man ihm eine Geschwindigkeit von $44{,}293^{m}$ ertheilen: er würde dann zum Aufsteigen $4\frac{1}{2}$ Secunde und ebensoviel Zeit zum Herabfallen gebrauchen.

Wir wollen nicht unterlassen, hier noch einmal daran zu erinnern, daß in der Praxis diese Resultate durch den beträchtlichen Einfluß des Widerstandes der Luft sehr bedeutend geändert werden, und daß die

Digitized by Google

Größe dieses Widerstandes von dem Verhältnisse des Gewichtes zur Oberfläche, sowie von der Form des fallenden Körpers abhängig ist. In dieser Beziehung sind die Versuche sehr bemerkenswerth, welche der Physiker Désaguliers im siebzehnten Jahrhundert in Gegenwart Newton's, Halley's, Derham's und anderer Gelehrter anstellte. Derselbe ließ von der Höhe der Laterne, welche die Kugel der Paulskirche überragt, verschiedene Körper, wie Bleikugeln von 2 Zoll (54 mm), mit Luft erfüllte Blasen von 5 Zoll (135 mm) Durchmesser, herabfallen, und es ergab sich, daß die Bleikugeln den Weg von 272 Fuß (88,35 m) in $4^1/_2$ Secunde, die Blasen dagegen in $18^1/_2$ Secunden zurücklegten: im luftleeren Raume würden sie denselben Weg in $4^1/_4$ Secunden zurückgelegt haben.

Da der Luftwiderstand mit der Geschwindigkeit wächst, so müssen die Körper, die aus sehr großer Höhe herabfallen, sich schließlich gleichförmig bewegen, sobald sie eine gewisse Geschwindigkeit erreicht haben. Man hat berechnet, daß ein Wassertropfen, dessen Rauminhalt den 500,000,000sten Theil eines Kubikcentimeters beträgt, sich in der Luft mit der vollständig gleichmäßigen Geschwindigkeit von 178 mm in der Secunde bewegen würde, daß er also in der Minute nur 10,7 m durchlaufe. Hierdurch wird es erklärlich, daß die Regentropfen eine verhältnißmäßig geringe Geschwindigkeit besitzen, trotzdem daß die Wolken, von welchen sie herabfallen, sich in ziemlich beträchtlicher Höhe befinden.

Drittes Kapitel.

Gesetze der Schwerkraft. — Das Pendel.

§ 1. Gleichheit der Schwingungsdauer eines Pendels. Verhältniß der Schwingungsdauer zur Pendellänge.

Als Newton eines Tages in seinem Garten zu Woolstrop saß, so bemerkte er, wie man erzählt, daß sich ein Apfel vom Baume löste und zur Erde herabfiel. Dieses alltägliche Ereigniß soll die Veranlassung gewesen sein, daß er über das Wesen der Schwerkraft ernstlich nachzudenken begann und sich die Frage vorlegte, ob diese geheimnißvolle Kraft, die aus der Entfernung den Apfel vom Baume herabzieht, der alle Körper unterworfen sind, sie mögen sich nun in der Tiefe der Thäler, oder

Digitized by Google

auf dem Gipfel der Berge befinden, ihre Wirkung nicht auch noch weiter erstreckt, ob ihr nicht selbst der Mond unterworfen ist. Mit Eifer begab sich nun dieser geistreiche Naturforscher an die Lösung dieser Aufgabe, aber leider gründete er seine Rechnungen auf Größenangaben, welche die Resultate fehlerhafter Beobachtungen über die Dimensionen unserer Erde waren; und erst nach ungefähr zwanzig Jahren, in welchem Zeitraume eine neue, genauere Vermessung der Größe der Erde stattgefunden hatte, gelang es ihm, seine Rechnungen mit den Beobachtungen in vollen Einklang zu bringen. Damit war aber auch das Gebäude errichtet, zu dem Kepler, Galilei, Huyghens den Grund gelegt hatten, und an dessen Ausbau und Vollendung die Nachfolger Newton's bisher ununterbrochen gearbeitet haben: wir meinen die Lehre von der allgemeinen Massenanziehung.

Ein ähnlicher Zufall, wenn man es als solchen bezeichnen will, war auch die Ursache für die Untersuchungen, die Galilei über die Pendelbewegung anstellte. Als derselbe noch Student in Pisa war, wohnte er einst einer gottesdienstlichen Handlung im Dome bei. Wenig aufmerksam auf die Ceremonie richtete er seine Blicke auf einen kostbaren Kronleuchter, ein Meisterstück Benvenuto Cellini's, welcher an einem langen Seile vor dem Altare hing und sich in langsamen Schwingungen hin und her bewegte. Allmählich gelangte die Lampe mehr und mehr zur Ruhe, die Schwingungen wurden nach und nach kleiner, und dennoch blieb die Zeit, die für eine Schwingung erforderlich war, immer genau dieselbe. Diese Erscheinung überraschte Galilei, er bestätigte ihre Richtigkeit durch Versuche, die er in seiner Wohnung anstellte, und fand bei dieser Gelegenheit zugleich die Beziehung, die zwischen der Dauer einer Schwingung und der Länge des Fadens, der das Gewicht trägt, besteht. Aber erst lange nach seiner Zeit, im Jahre 1673, hat Huyghens diese schönen Entdeckungen vervollständigt und das mathematische Gesetz für die Pendelbewegung aufgestellt.

Dieses Gesetz wollen wir jetzt erläutern und zugleich zeigen, wie es mit der Lehre von der Schwerkraft zusammenhängt.

Denken wir uns am Ende eines Fadens, der sich nicht ausdehnt und selbst kein Gewicht hat, einen kleinen, aber schweren Körper M' befestigt, so wird derselbe den in seinem oberen Ende in A befestigten Faden spannen und ihn zwingen, die senkrechte Richtung anzunehmen; das ganze

Digitized by Google

System aber wird zunächst in Ruhe bleiben. Bringt man nun den Körper M' in die Lage M, indem man immer den Faden in seiner Spannung erhält, so wird die Schwerkraft auch jetzt noch in aller Stärke auf ihn wirken. Da nun die Richtung dieser Kraft immer mit der Senkrechten zusammenfällt, die Richtung des Fadens aber jetzt von dieser Stelle abweicht, so wird die Festigkeit des letzteren die Schwerkraft nicht mehr vollständig aufheben, und folglich muß der Körper herabfallen. Ist nun aber der Faden, wie wir vorausgesetzt haben, nicht ausdehnsam, so kann die Bewegung nur längs eines Kreisbogens erfolgen, dessen Mittelpunkt im Anfhängepunkte A liegt, und dessen Halbmesser gleich der Fadenlänge AM ist. Es ist, als ob sich der Punkt auf einer schiefen Ebene bewegte, deren Gipfel M ist und deren Neigung allmählich immer mehr abnimmt. Durch Rechnung läßt sich beweisen, daß die Geschwindigkeit bei dieser Bewegung so lange zunimmt, bis der Faden in seine senkrechte Lage zurückgekehrt ist: hierauf aber wird der Körper infolge der Geschwindigkeit, die er einmal erlangt hat, nach der entgegengesetzten Seite einen dem vorigen gleichen Bogen beschreiben, wobei seine Geschwindigkeit wieder abnimmt. Ist er in M", das in gleicher Höhe mit M liegt, angelangt, so wird seine Bewegung für einen Augenblick erlöschen: alsbald aber wird er den Rückweg antreten und eine der vorigen vollständig gleiche Bewegung ausführen, da jetzt die Bedingungen den vorigen genau gleich sind. So würde die Bewegung ewig fortdauern, wenn Reibung und Luftwiderstand sie nicht allmählich zum Erlöschen brächten.

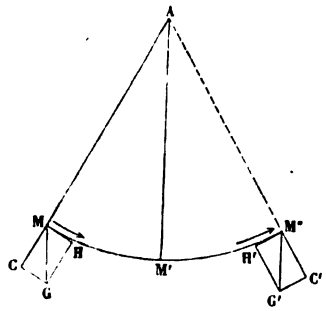


Fig. 13. Schwingende Bewegung eines einfachen Pendels.

Ein solcher Apparat, wie wir ihn vorausgesetzt haben, und den man als ein einfaches oder mathematisches Pendel bezeichnet, läßt sich nun in aller Strenge nicht construiren, da es weder gewichtslose, noch unverlängerbare Fäden giebt, und da sich das angehängte Gewicht nicht auf einen Punkt reduciren läßt. Deshalb muß man sich in der Praxis mit annähernd ähnlichen Apparaten begnügen, die man als zusammengesetzte oder physikalische Pendel bezeichnet. Die ganze Bewegung von M bis M" bezeichnet man als eine Schwingung,

Digitized by Google

und die Zeitdauer, welche zur Vollendung dieser Bewegung erforderlich ist, als Schwingungsdauer.

Um es noch einmal zusammenzufassen, so lassen sich die theoretischen Resultate aus verschiedenen Gründen niemals in voller Reinheit beobachten: weil erstens der aufgehängte Körper nicht ein einzelner Punkt sondern eine Linse oder Kugel aus irgend einem Metall ist, weil zweitens die Pendelstange selbst einen gewissen Raum einnimmt und ein gewisses Gewicht besitzt, weil drittens der Widerstand der Luft bei jeder Schwingung einen Theil der Bewegung aufhebt, und weil endlich viertens die Schneide, auf der der ganze Apparat ruht, beständig einen Reibungswiderstand zu überwinden hat.

Stellt man daher Versuche mit zusammengesetzten Pendeln an, so werden die Gesetze nicht mit absoluter Genaugkeit erfüllt; wenn man aber möglichst sorgfältig gearbeitete Apparate verwendet, die sich dem idealen einfachen Pendel möglichst nähern, so kann man dennoch aus ihnen die Pendelgesetze ableiten, sobald man nur die Abweichungen vom einfachen Pendel, sowie alle Widerstände, die zu überwinden sind, mit in Rechnung zieht.

Wir wollen jetzt diese Gesetze, die für Wissenschaft und Praxis gleiche Wichtigkeit besitzen, in Worte fassen: denn durch sie ist das Pendel das wichtigste Instrument zum Messen der Zeiträume geworden, ebenso wie man mit seiner Hülfe die genauesten Werthe für die Gestalt der Erde gefunden hat, und wie man es gleichsam als Wage benutzt, um das Gewicht der Erdkugel zu bestimmen.

Das erste Gesetz des Pendels, welches Galilei entdeckt, lautet folgendermaßen:

Die Dauer kleiner Schwingungen eines und desselben Pendels ist von der Schwingungsweite unabhängig; die Schwingungen sind isochron, d. h. sie werden alle in derselben Zeit ausgeführt.

Unter kleinen Schwingungen versteht man solche, deren Ausschlagswinkel kleiner als 4° ist. Streng genommen ist auch innerhalb dieser Grenzen die Zeitdauer für eine Schwingung mit größerer Schwingungsweite etwas größer, allein die Unterschiede sind so gering, daß sie erst nach einer sehr großen Zahl von Schwingungen überhaupt merklich werden.

Die Gleichmäßigkeit der Schwingungsdauer eines und desselben Pendels

Digitized by Google

ist zunächst theoretisch abgeleitet worden: es ist aber auch leicht, sie experimentell zu bestätigen; man braucht nur eine bedeutende Zahl von Schwingungen abzuzählen und mit Hilfe eines guten Chronometers die Zahl der inzwischen verflossenen Secunden zu bestimmen. Durch einfache Division findet man nun die Schwingungsdauer, und man kann sich leicht überzeugen, daß dieselbe zu Ende des Versuchs, wo die Schwingungen sehr klein sind, noch eben so groß geblieben ist, als zu Anfang, wo dieselben größer waren.

Es könnte für den ersten Augenblick auffallen, daß trotz der Verschiedenheit der Wege, welche das Pendel bei ungleichen Ausschlägen zurücklegen muß, die Zeit, die zum Zurücklegen dieser Wege erforderlich ist, dennoch dieselbe bleibt. Dieses unerwartete Resultat läßt sich aber auch ohne streng mathematischen Nachweis durch folgende Ueberlegung leicht begreifen. Hat der Ausschlagswinkel einen größeren Werth, so ist auch der Weg, den das Pendel von der äußersten Lage M aus zurückzulegen hat, stärker geneigt, als bei geringerem Ausschlagswinkel: es gleitet auf einer steileren schiefen Ebene herab, und mithin wird es durch die Schwerkraft auch in größere Geschwindigkeit versetzt. Hebt man daher zwei Pendel von gleicher Länge auf verschiedene Entfernungen aus, so hat zwar dasjenige, das sich mit geringerer Schwingungsweite bewegt, einen Vorsprung, der aber durch die größere Fallgeschwindigkeit des anderen vollständig ausgeglichen wird, sodaß beide gleichzeitig in die Mittellage gelangen.

Das zweite Pendelgesetz belehrt uns über den Zusammenhang, in welchem Schwingungsdauer und Pendellänge stehen.

Verfertigt man eine Reihe von Pendeln, deren erstes Secunden schlägt, während die Dauer einer Schwingung der übrigen 2, 3, 4... Sec. beträgt, so wird man finden, daß die Länge der letzteren 4, 9, 16... mal so groß ist, als die Länge des ersten: während die Schwingungszeiten im Verhältnisse der einfachen Zahlen stehen, verhalten sich die Pendellängen, wie die Quadrate derselben Zahlen. Allgemein wird man also folgendes zweites Gesetz aufstellen können:

Die Pendellängen verhalten sich direct, wie die Quadrate der Zeiten, die zu den Schwingungen erforderlich sind.

Theorie und Beobachtung geben übereinstimmend dieses wichtige Gesetz: Da wir uns aber in diesem Werke nur auf die experimentelle Bestätigung

Digitized by Google

beschränken wollen, und da wir wissen, daß die Herstellung eines einfachen Pendels ein Ding der Unmöglichkeit ist, so ist es nunmehr an der Zeit zu fragen, wie sich die Gesetze, die für dieses ideale Pendel gelten würden, auf das wirkliche oder zusammengesetzte Pendel übertragen lassen.

Diese Pendel bestehen gewöhnlich aus einer Linse oder Kugel von Metall, welche an einer Stange so befestigt ist, daß die Richtung der Stange durch den Mittelpunkt der Linse oder Kugel geht. Am oberen Ende ist in diese Stange ein horizontales dreiseitiges Stahlprisma eingefügt, das auf einer harten, polirten Fläche ruht (Fig. 14). So sind z. B. gewöhnlich die Pendel beschaffen, welche den Gang der Räder eines Uhrwerks durch ihre Schwingungen reguliren.

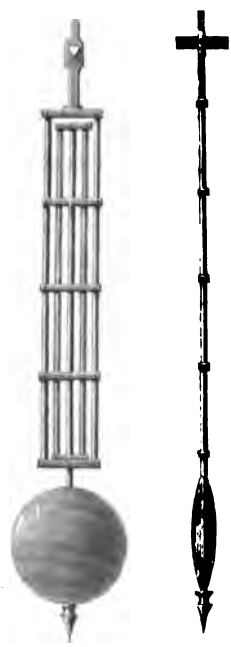


Fig. 14. Zusammengesetztes Pendel.

Bei einem solchen Systeme darf man nun nicht etwa den Abstand des tiefsten Punktes vom Stützpunkte als Pendellänge ansehen, sondern es wird einen anderen, näher liegenden Punkt geben, der als Endpunkt eines einfachen Pendels angesehen werden kann, das mit dem zusammengesetzten gleichzeitig schwingt. In dem Falle, daß die Pendelstange außerordentlich dünn ist und einen sehr dichten Körper, etwa eine Platinkugel, trägt, wird dieser Punkt, den man den Schwingungsmittelpunkt nennt, etwa in den Mittelpunkt der Kugel fallen. Daß aber der Schwingungsmittelpunkt eines zusammengesetzten Pendels nicht in den Endpunkt desselben fallen kann, läßt sich durch folgende Ueberlegung einsehen.

Das einfache Pendel besitzt nur einen einzigen materiellen Punkt, von dessen Entfernung vom Stützpunkte die Schwingungsdauer abhängt; das zusammengesetzte Pendel dagegen besteht aus unzählig vielen materiellen Theilchen: wäre nun jedes derselben der Körper eines Pendels, so würden dieselben, wenn sie von einander unabhängig wären, mit sehr verschiedener Geschwindigkeit schwingen, und zwar würden diejenigen, welche dem Stützpunkte näher liegen, ihren Weg mit größerer Geschwin-

Digitized by Google

digkeit zurücklegen, als die entfernteren. Da die Theilchen nun aber fest mit einander verbunden sind, so müssen sie alle ihre Schwingungen in gleicher Zeit vollenden: es wird also die Geschwindigkeit jedes einzelnen Theilchens durch den Einfluß der dem Stützpunkt näher liegenden beschleunigt, durch den Einfluß der entfernteren verzögert. Hieraus folgt, daß es am Pendel einen Punkt geben muß, für welchen sich die Wirkung der Beschleunigung und der Verzögerung aufhebt, der also ebenso schnell schwingt, als wenn er der Körper eines einfachen Pendels wäre, und dieser Punkt ist eben der Schwingungsmittelpunkt. Wenn die Gestalt des zusammengesetzten Pendels nicht gar zu complicirt ist, so gestattet die mathematische Analysis, diesen Punkt durch Rechnung zu finden.

§ 2. Anwendung des Pendels auf die Bestimmung der Gestalt und Dichtigkeit der Erde.

Wir wollen jetzt versuchen klar zu machen, wie es möglich war, mit Hülfe von Pendelbeobachtungen wichtige Fragen bezüglich der Gestalt und physischen Beschaffenheit unsers Planeten zu beantworten.

Wie wir oben auseinandergesetzt haben, ist die Dauer der Schwingungen eines Pendels von seiner Länge abhängig: jetzt müssen wir hinzufügen, daß dieselben weiter von der Intensität abhängen, welche die Schwerkraft am Beobachtungsorte besitzt.

Wenn man daher die Zahl der Schwingungen eines Pendels, dessen Länge mit der größten Genauigkeit gemessen worden ist, während eines Tages zählt, so kann man hieraus die Dauer einer einzelnen Schwingung in größter Schärfe bestimmen: aus dieser Größe läßt sich aber die Intensität der Schwerkraft ableiten, d. h. das doppelte des Weges, welchen ein frei fallender Körper in der ersten Secunde im leeren Raume zurücklegen würde. In welcher Weise diese Größen aus einander berechnet werden können, darüber giebt die mathematische Analysis Aufschluß.

Durch diese Methode hat man die oben angeführte Zahl $9{,}8094^{m}$ für die Schwerkraft in der Breite von Paris bestimmt. Umgekehrt findet sich aus dieser Zahl die Länge des Secundenpendels in Paris gleich 994^{mm}.

Denken wir uns jetzt, daß ein Beobachter vom Aequator bis zu einem Pole reise, so würde er an den verschiedenen Punkten seines Weges vom Erdmittelpunkte verschieden weit entfernt sein, weil die Erde nicht

Digitized by Google

genau kugelförmig ist. Sein Abstand vom Mittelpunkte wird nämlich am Aequator einen größten Werth besitzen, wird darauf abnehmen, durch einen Mittelwerth hindurch gehen, und endlich am Pole am kleinsten sein. Schon aus diesem Grunde muß die Schwerkraft vom Aequator nach dem Pole hin zunehmen: es kommt aber noch ein zweiter Grund dazu, nämlich die Axendrehung der Erde, welche der Schwerkraft entgegen wirkt und dieselbe zum Theil aufhebt. Diese Drehung übt aber am Aequator den größten Einfluß aus und vernichtet also dort den verhältnißmäßig größten Theil der Schwerkraft, während ihr Einfluß am Pole gleich Null ist. Also auch dieser Grund bewirkt, daß die Wirkung der Schwere am Aequator ihren kleinsten Werth hat.

Um nun diese Abnahme der Schwerkraft vom Pole zum Aequator in aller Schärfe bestimmen zu können, benutzt man die Schwingungen von Pendeln, und zwar giebt es zwei Methoden, wie man das gewünschte Resultat erhalten kann.

Bei der ersten Methode wendet man ein Pendel von unveränderlicher Länge an, bei welchem Pendelstange und Linse fest aneinander geschmiedet sind, und bei welchem auch die Schneide, auf der es ruht, sich nicht verschieben läßt. Ein solches Pendel, dessen Länge sich nur unter dem Einfluß der Temperatur verändern kann, wird um so schneller schwingen, je größer die Intensität der Schwerkraft ist, sodaß die Zahl seiner Schwingungen im Laufe eines Tages zunehmen muß, wenn man sich mit ihm vom Aequator nach dem Pole hin begiebt. So würde z. B. ein Pendel von 1 Meter Länge, welches in Paris während 24 Stunden 86,137 Schwingungen macht, am Aequator in derselben Zeit deren nur 86,017, am Pol dagegen 86,242 machen.

Bei der zweiten Methode läßt man an jedem Beobachtungsorte ein beliebiges Pendel schwingen, dessen Länge man aber sehr genau messen kann: man zählt nun dessen Schwingungen während eines genügend großen Zeitraumes, und berechnet dann aus der gefundenen Zahl nach dem oben angeführten zweiten Lehrsatze die Länge des Pendels, welches an dem Beobachtungsorte Secunden schlagen würde. Vergleicht man nun die gefundenen Längen der Secundenpendel an den verschiedenen Beobachtungsorten, so kann man daraus die Verhältnisse der Intensitäten der Schwerkraft für jene Punkte der Erdoberfläche bestimmen.

Die ersten Versuche, auf diesem Wege die Veränderung der Schwer-

Digitized by Google

kraft zu bestimmen, wurden durch Richer angestellt, der sich zu diesem Zwecke im Jahre 1671 von Paris nach Cayenne begab; seit jener Zeit aber sind die bedeutendsten Männer der Wissenschaft ununterbrochen bemüht gewesen, die Aufgabe zu lösen, die Länge des Secundenpendels an verschiedenen Orten zu ermitteln und dadurch die Gestalt der Erde zu bestimmen. Wir wollen hier die Werthe übersichtlich zusammenstellen, welche verschiedene Naturforscher für die Länge des Secundenpendels in Paris gefunden haben, woraus man zugleich die Genauigkeit erkennen kann, bis zu welcher man diesen Werth gefunden hat:

Länge des Secundenpendels in Paris.

Nach Picard	994,000 mm
„ Richer und Huyghens . .	994,200
„ Godin	993,930
„ Bouguer	994,180
„ Mairan	994,032
„ Whiteurst	993,877
„ Borda	993,896
„ Biot und Mathieu	993,915
„ Kater	993,998
„ Bessel	993,781.

Man sieht, daß der Mittelwerth von 994 mm nur sehr wenig abweichen kann. Wir geben hier die Ansicht des Pendels, welches Borda construirte und welches er, so wie Biot und Mathieu bei ihren Untersuchungen in Paris, Bordeaux und Dünkirchen benutzten. (Fig. 15 und 16).

Fig. 15. Borda's Pendel.

Das Borda'sche Pendel bestand aus einer Platinkugel von $36\frac{1}{2}$ mm Durchmesser, welche nur durch Adhäsion an einer mit einer dünnen Talgschicht bedeckten Metallplatte hing, die selbst wieder an einem sehr feinen und überall gleich starken Metalldrahte befestigt war. Dieser Metalldraht wurde an seinem oberen Ende von einer kleinen Säule getragen, welche mit einer Schneide auf einer Unterlage auflag in ähnlicher Weise, wie die Pendelstange bei den

Digitized by Google

Uhren. Die Unterlage für die Schneide bestand aus zwei gut polirten Ebenen aus sehr hartem Stein, denen eine genaue horizontale Stellung gegeben war: diese Ebenen selbst waren in eine große Eisenplatte eingelassen, welche auf Trägern ruhte, die in eine sehr feste Mauer eingemauert und dadurch vollständig unbeweglich waren.

Die Schwingungen dieses Pendels wurden mit denen eines Chronometers verglichen, der an der Wand hinter dem Pendel so befestigt war, daß seine Stützen mit denen des Platinpendels in durchaus keinem Zusammenhange standen, und dessen Bewegung genau nach Sternbeobachtungen regulirt war. Mit Hülfe eines Fernrohrs, welches in 10 m Entfernung aufgestellt war, beobachtete man, wann die beiden Pendel gleichzeitig durch die Mittellage hindurch gingen. Aus der Zahl der Secunden, welche von einer solchen Coïncidenz bis zur nächsten verfloß, ließ sich nun die Schwingungsdauer des Platinpendels mit großer Genauigkeit bestimmen. Auf die Art, wie nun die Länge des Pendels sorgfältig ermittelt wurde, können wir hier nicht weiter eingehen: man findet das Nähere darüber in Biot's physischer Astronomie Bd. II.

Fig. 16. Borda's Pendel. Bestimmung der Schwingungsdauer nach der Methode der Coïncidenzen.

Digitized by Google

Im Vorstehenden haben wir die Länge des Secundenpendels für Paris mitgetheilt: wir wollen nunmehr dieselbe Länge auch für die Pole, den Aequator und die mittlere Breite von 45° hinzufügen, und zugleich auch die daraus berechnete Schwerkraft oder, was dasselbe ist, die Geschwindigkeit, welche ein im luftleeren Raume frei fallender Körper nach der ersten Secunde erlangen würde, angeben:

	Länge des Secundenpendels.	Intensität der Schwerkraft.
Am Aequator	991,03 mm	9,78103 m
In der Breite von 45° . .	993,52	9,80606
An den Polen	996,19	9,83109

Wie wir schon oben erwähnt haben, hängt die Veränderung der Schwerkraft auf der Erdoberfläche nicht allein von der Gestalt der Erde, d. h. von ihrer Abweichung von der Kugelform ab, sondern auch von der Fliehkraft, welche durch die Axendrehung der Erde erzeugt wird; und aus diesem Grunde nimmt die Schwerkraft von den Polen nach dem Aequator hin stärker ab, als dies ohne die Bewegung der Erde der Fall sein würde. Da man aber weiß, wie groß der Antheil ist, den jede dieser Ursachen an der Erscheinung hat, so ist es möglich geworden, die Abplattung der Erde aus den Pendelbestimmungen zu ermitteln und dadurch sowol die Resultate der geodätischen Untersuchungen, als auch Clairaut's Behauptung zu bestätigen, daß die Dichtigkeit der inneren Schichten von der Oberfläche nach dem Mittelpunkt zunimmt.

Vergleicht man die Pendelbeobachtungen in verschiedenen Gegenden der Erde, so hat man die merkwürdige Thatsache beobachtet, daß sie an manchen Stellen eine größere anziehende Kraft anzeigten, als man nach der Rechnung erwarten sollte: an anderen Stellen ist dagegen diese Kraft geringer, als nach der elliptischen Gestalt zu erwarten war. Da jene Fälle, in welchem die Schwerkraft zu groß beobachtet wurde, besonders auf den Inseln stattfanden, welche weit draußen im Meere liegen, während der entgegengesetzte Fall besonders an der Küste und im Innern der Festländer eintritt, so hat man daraus geschlossen, daß „der Spiegel des Wassers in der Mitte der Weltmeere sich stärker erniedrigt, sodaß er sich dem Mittelpunkt mehr nähert; daß sich dagegen dieser Spiegel in der Nachbarschaft großer Festländer zu bedeutender Höhe erhebt und sich vom Mittelpunkte mehr entfernt." (Saigey, Physik der Erde.) Also sogar die Ungleichheiten in der Krümmung der Erdkugel werden durch das Pendel angezeigt.

Digitized by Google

Beobachtet man unter derselben geographischen Breite die Länge des Secundenpendels auf dem Gipfel eines hohen Berges und am Meeresspiegel, so kann man aus der Vergleichung der gefundenen Werthe die Dichtigkeit der Erde berechnen. Zu demselben Resultat gelangt man, wenn man die Schwingung eines Pendels an der Oberfläche und in einer gewissen Tiefe im Innern der Erde beobachtet. So ließ Airy, der gegenwärtige Director der Sternwarte zu Greenwich, in den Bergwerken von Harton in einer Tiefe von 384^{m} unter der Erdoberfläche, und gleichzeitig an der Erdoberfläche selbst zwei gleiche Pendel schwingen, und beobachtete, daß das untere Pendel sich schneller bewegte, als das obere, sodaß es das letztere in 24 Stunden um 2^{1}_{4} Sec. überholte. Hieraus schloß er, daß die Schwerkraft von der Oberfläche bis zum tiefsten Punkte des Schachtes um ungefähr den 20,000sten Theil ihrer Größe zunimmt.

Aus diesem Resultate folgt, daß die Dichtigkeit der Erdschichten von der Oberfläche nach dem Mittelpunkte hin wächst: denn wenn der entgegengesetzte Fall stattfände, so müßte die Schwerkraft nach dem Innern zu abnehmen, was der Beobachtung widerspricht. Da man nun die Dichtigkeit der Schichten, welche zwischen der Oberfläche und dem Grunde des Schachtes liegen, kennt, so läßt sich aus der Zunahme der Pendelgeschwindigkeit das Verhältniß dieser Dichtigkeit zu der des Kernes der Erde berechnen, und daraus endlich die mittlere Dichtigkeit des Erdganzen bestimmen. Sowol durch diese, als auch durch andere ähnliche Untersuchungen hat man Resultate bekommen, welche ein wenig von einander abweichen, was aber auch nicht Wunder nehmen kann bei einer so verwickelten Aufgabe. Man nimmt jetzt gewöhnlich an, daß die mittlere Dichtigkeit der Erde ungefähr 5^{1}_{2} mal so groß ist, als die eines gleichen Volumen Wasser, und daß die Schichten in der Nähe des Mittelpunktes eine Dichtigkeit haben, welche etwa das Doppelte des Mittelwerths beträgt, der selbst wieder ungefähr doppelt so groß ist, als die Dichtigkeit der Schichten in der Nähe der Oberfläche.

Digitized by Google

Viertes Kapitel.

Gewicht der Körper.

§ 1. Gleichgewicht schwerer Körper. — Schwerpunkt.

Alle Körper erlangen, wie wir gesehen haben, wenn sie im leeren Raume aus gleicher Höhe herabfallen, dieselbe Geschwindigkeit, woraus man schließen muß, daß sie von der Erde in ganz gleicher Weise angezogen werden, welches auch ihre Form, ihre Größe und die Natur ihres Stoffes sein mag. Denkt man sich daher einen Körper aus lauter einzelnen Theilchen zusammengesetzt, welche alle unter sich gleich sind, so wird jeder derselben von der Erde in gleicher Stärke angezogen (Fig. 17), und da diese einzelnen Kräfte alle unter sich parallel sind, so lassen sie sich durch eine einzige Kraft ersetzen, welche wieder in derselben Richtung wirkt und ihrer Summe gleich ist. Diese Kraft, welche die Anziehung aller einzelnen Theilchen vertritt, heißt das Gewicht, und der Punkt G, in welchem sie ihren Sitz hat, der Schwerpunkt des Körpers. Unterstützt man diesen Punkt, so muß der Körper im Gleichgewichte bleiben, in welcher Lage er sich sonst auch befinden mag. Daß dieser Punkt nicht immer in die Masse des Körpers fallen muß, sondern daß er in manchen Fällen außerhalb derselben, etwa in Hohlräumen des Körpers liegt, werden wir später sehen.

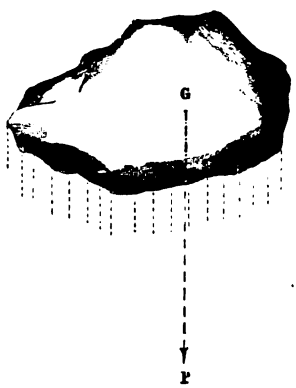


Fig. 17. Gewicht des Körpers. Schwerpunkt.

Wir haben weiter oben darauf aufmerksam gemacht, daß man sich hüten muß, die Schwerkraft mit dem Gewichte der Körper zu verwechseln; in gleicher Weise muß man aber auch letzteres von der Masse wohl unterscheiden. Unter der Masse eines Körpers versteht man weiter nichts, als die Menge des Stoffes, welche in ihm erhalten ist, gleichviel ob sich derselbe an der Oberfläche der Erde, oder an irgend einer andern Stelle im Weltenraum befindet, ob er von der Erde angezogen wird oder dieser Anziehung entrückt ist; während das Gewicht durch die Anziehung überhaupt erst hervorgerufen wird, und mithin auch von der Stärke dieser Anziehung

Digitized by Google

abhängig ist. Durch folgendes Beispiel wird es klar werden, wie nothwendig es ist, diese beiden Begriffe streng auseinander zu halten.

Hängt man irgend einen schweren Körper, etwa ein Stück Eisen, an eine Federwage (s. Fig. 1), so wird das Gewicht die Feder zusammendrücken und die Zeiger auf einen bestimmten Punkt einstellen. Stellen wir den Versuch zunächst an unserem Wohnorte an und vermerken wir genau den Punkt, auf den sich der Zeiger einstellt; hierauf begeben wir uns mit dem Apparate nach dem Aequator, so wird in diesem Falle dasselbe Stück Eisen die Feder nicht ganz so weit herabdrücken, da es wegen Verminderung der Schwerkraft an diesem Ort nicht mehr ganz so stark angezogen wird: umgekehrt wird es am Pole die Feder stärker herabziehen, weil hier die Anziehung der Erde einen größeren Werth besitzt. Wir finden also, daß das Gewicht desselben Stücks Eisen an den drei Beobachtungsorten verschieden ist, obgleich sich an seiner Masse durchaus nichts geändert hat: es ist also die Verschiedenheit des Gewichtes nur durch den Unterschied der Schwerkraft bewirkt worden, ohne daß die Masse verändert worden ist.

Dieselbe Beobachtung, daß sich das Gewicht ändert, während die Masse dieselbe Größe behält, würde man in gleicher Weise anstellen können, wenn man den Körper entweder in bedeutende Höhe über, oder in bedeutende Tiefe unter die Erdoberfläche versetzt. Bei allen diesen Versuchen kann man die Federwage durch eine gewöhnliche Wage nicht ersetzen, weil die Aenderung der Schwerkraft ebenso auf die Körper, die man als Gewichte anwendet, wie auf die zu wiegenden Körper ihren Einfluß ausübt, während die Spannung der Feder hiervon unabhängig ist. Durch Rechnung hat man gefunden, daß ein Körper, der in der Breite des mittleren Europa 1000 gr. wiegt, am Aequator nur noch ein Gewicht von 998,127 gr. besitzt, also um $^1/_{534}$ leichter geworden ist: am Pole dagegen würde sein Gewicht auf 1002,211 gr., also um etwas mehr als $^1/_{450}$ zugenommen haben.

Das gesammte Gewicht kann man sich, wie erwähnt, in einem Punkte, dem Schwerpunkte, vereinigt denken, dessen Lage zu kennen für die Entscheidung vieler Fragen von Wichtigkeit ist. Wenn die Masse in einem Körper ganz gleichmäßig vertheilt ist, und wenn der Körper sehr regelmäßige Form besitzt, so läßt sich die Lage jenes Punktes leicht geometrisch bestimmen, wie wir an einigen der einfachsten Formen zeigen werden.

Digitized by Google

Bei einer geraden Linie liegt der Schwerpunkt in der Mitte: ſtreng genommen iſt zwar das was wir in der Phyſik eine Linie nennen, eigentlich immer ein prismatiſcher oder cylindriſcher Körper; iſt aber ihre Dicke im Verhältniß zur Länge ſehr gering, ſo kann man dieſelbe ohne

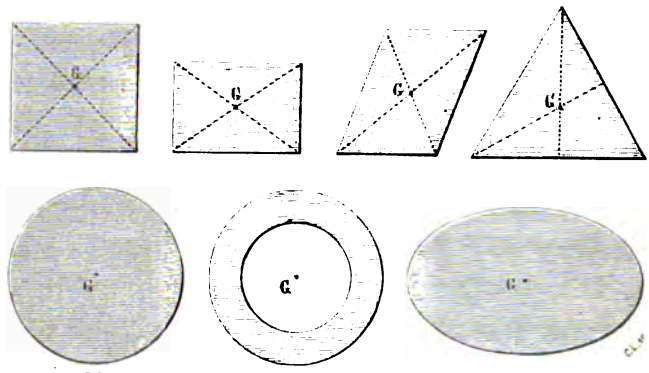


Fig. 18. Schwerpunkt verſchiedener ebener Figuren.

Nachtheil vernachläſſigen. Dieſelbe Bemerkung läßt ſich für ſehr dünne Platten machen, welche man als ebene oder gekrümmte Flächen ohne Dicke anſehen darf.

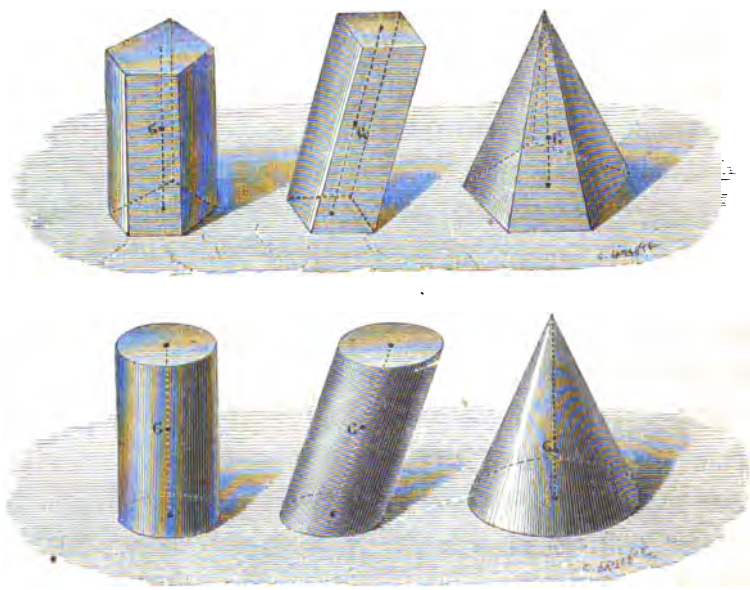


Fig. 19. Schwerpunkt einiger Körper.

So liegt der Schwerpunkt eines Quadrats, eines Rechtecks, oder allgemein eines Parallelogramms im Durchſchnittspunkte der Diagonalen

Digitized by Google

(Fig. 18), eines Dreieckes in dem Punkte, wo sich die Verbindungslinien der Ecken mit den Mitten der Seiten durchschneiden, oder auf jeder dieser Linien in ein Drittel Entfernung von der Seite an gerechnet, endlich eines Kreises, eines Kreisringes und einer Ellipse im Mittelpunkte.

Die geraden und schiefen Cylinder, sowie die regelmäßigen Prismen und die Parallelepipeda (Fig. 19) haben ihren Schwerpunkt in der Mitte der Axe, Kugel und Rotationsellipsoid (Fig. 20) im Mittelpunkt; während man bei der Pyramide und dem geraden oder schiefen Kegel (Fig. 19) die Spitze mit dem Mittelpunkte der Grundfläche verbinden und von dieser Linie von der Grundfläche aus ein Viertel abschneiden muß, um den Schwerpunkt zu finden.

Fig. 20. Schwerpunkt der Kugel und des Ellipsoids.

So kann man den Schwerpunkt für noch manchen Körper bestimmen, dessen Gestalt eine regelmäßige ist. Am häufigsten aber besitzt die Form der Körper keine Regelmäßigkeit, oder die Masse ist in denselben ungleichmäßig vertheilt. In diesen Fällen ist es immer möglich, die Lage des Schwerpunktes in folgender Weise experimentell zu bestimmen.

Man hängt den Körper an einem Faden auf und wartet, bis er zur Ruhe gelangt ist, so weiß man sicher, daß der Schwerpunkt auf der Verlängerung des Fadens liegt. Nun macht man die Richtung des Fadens bemerklich und wiederholt den Versuch, indem man den Faden an einem andern Punkte des Körpers befestigt, wodurch man eine zweite Richtung bestimmt, in welcher der Schwerpunkt zu suchen ist. Da wo beide Linien sich schneiden (Fig. 21), mag das im Innern des Körpers oder in einem Hohlraume desselben geschehen, liegt der Schwerpunkt.

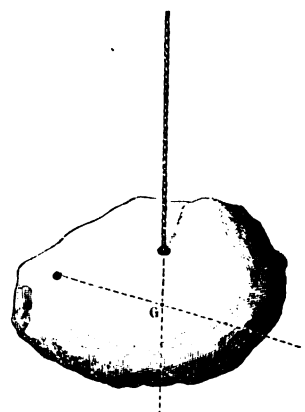


Fig. 21. Bestimmung des Schwerpunktes eines unregelmäßigen Körpers.

Aus der Definition des Schwerpunktes geht hervor, daß der Körper sich im Gleichgewichte befindet, sobald jener Punkt unterstützt oder befestigt

Digitized by Google

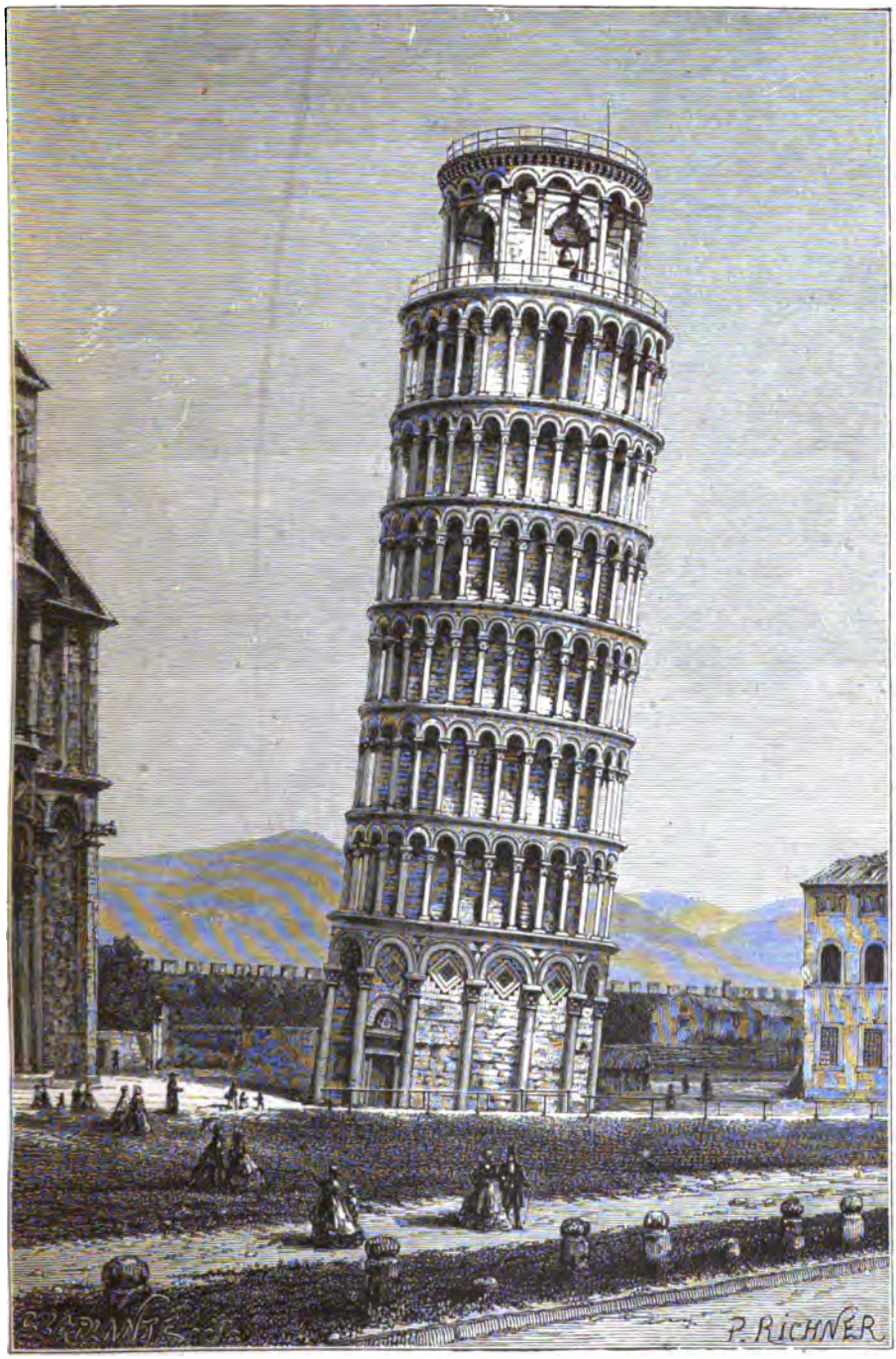
ist. Allein diese Forderung ist schwer zu erfüllen, da der Schwerpunkt meistens im Innern der Masse des Körpers liegt und folglich nicht unmittelbar unterstützt werden kann; man muß daher den Körper entweder in einem Punkte seiner Oberfläche aufhängen oder ihn auf seiner unteren Seite durch eine Fläche unterstützen.

Ist der Körper an einem Faden oder einem biegsamen Drahte aufgehängt, so wird sich das Gleichgewicht von selbst herstellen, sobald der Schwerpunkt in die Richtung fällt, welche durch den gespannten Faden angegeben wird. Bringt man den Körper ein wenig aus dieser Gleichgewichtslage, so ist er als ein zusammengesetztes Pendel anzusehen, er wird also eine Reihe Schwingungen um seine Gleichgewichtslage machen und endlich in der vorigen Lage wieder zur Ruhe gelangen. Man bezeichnet dieses Gleichgewicht als stabil, und es ist leicht einzusehen, daß die Hauptbedingung für diese Art des Gleichgewichtes die ist, daß der Schwerpunkt senkrecht unter dem Unterstützungspunkte liegt, sodaß er auf alle Fälle sich heben muß, sobald man den Körper nach irgend welcher Seite hin aus seiner Ruhelage bringt.

Fig. 22. Gleichgewicht eines Körpers, der auf einer Unterlage mit einer Fläche oder mit einem Punkte aufliegt.

Doch nicht nur, wenn ein Körper oberhalb seines Schwerpunktes aufgehängt ist, kann Gleichgewicht stattfinden: dasselbe tritt auch dann ein, wenn die Unterstützung unterhalb des Schwerpunktes angebracht ist, sobald nur die Senkrechte vom Schwerpunkte aus den unterstützten Punkt trifft oder innerhalb der Umfangsfigur der unterstützten Punkte fällt, wenn sich die Unterstützung nicht auf einen einzelnen Punkt beschränkt. Figur 22 und 23 geben hierfür verschiedene Beispiele; und auch die schiefen Thürme von Bologna und Pisa, welch letzterer in Tafel I abgebildet ist, lassen sich hier erwähnen. Es ist selbstverständlich, daß bei

Digitized by Google



Schiefer Thurm zu Pisa, auf welchem Galilei seine ersten Versuche über den Fall fester Körper anstellte.

Digitized by Google

LIBRARY
OF THE
UNIVERSITY
OF
CALIFORNIA

Digitized by Google

dieſen Thürmen die einzelnen Theile des Mauerwerks ſo feſt in einander verbunden ſein müſſen, daß die Steine nicht von einander loslaſſen und einzeln herabfallen können: iſt aber dieſe Bedingung erfüllt, ſo genügt zum Feſtſtehen, daß die Senkrechte vom Schwerpunkte des ganzen Gebäudes aus innerhalb des Grundes des Thurmes den Erdboden trifft.

Fig. 23. Gleichgewicht eines Körpers, der mit drei Punkten auf einer Ebene ruht.

Der Waſſerträger in Fig. 24 neigt ſich nach rechts, der Laſtträger nach vorn, damit die Senkrechte von dem gemeinſamen Schwerpunkte ihres eigenen Körpers und der Laſt, die ſie tragen, innerhalb der Grundfläche trifft, die durch ihre Füße gebildet wird. Auch der Wagen in Fig. 25, welcher auf einem ſehr geneigten Wege fährt, bleibt im Gleichgewichte, ſo lange der Schwerpunkt oberhalb des Vierecks liegt, deſſen Eckpunkte durch die vier Räder gebildet werden. Iſt die Fläche des Weges zu ſtark geneigt, oder ſind die Stöße beim Fahren ſo ſtark, daß jener Punkt jenſeits der Grenzen des Vierecks gelangt, ſo fällt der Wagen um.

Fig. 24. Gleichgewichtsſtellungen von Perſonen, welche Laſten tragen.

Fig. 25. Gleichgewicht auf einer geneigten Fläche.

Iſt ein Körper nur in einem einzigen Punkte

Digitized by Google

unterstützt, oder ist er an einer Axe befestigt, um welche er sich frei drehen kann, so ist sein Gleichgewicht entweder *stabil* oder *indifferent*, oder *labil*, je nachdem sein Schwerpunkt unter, oder in, oder über den Unterstützungspunkt fällt, welche drei Fälle durch Fig. 26 anschaulich gemacht werden.

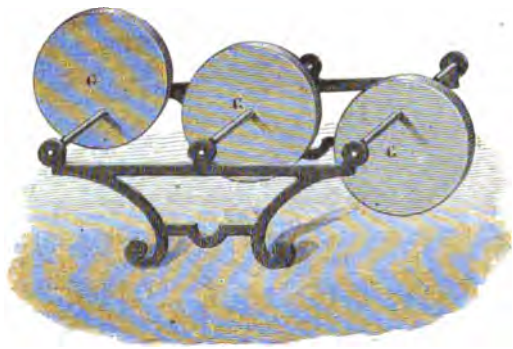


Fig. 26. Labiles, indifferentes und stabiles Gleichgewicht.

Im *stabilen* Gleichgewichte befinden sich alle an ihrem oberen Ende aufgehängten Körper, wie die Pendel: werden dieselben ein wenig aus der Gleichgewichtslage entfernt, so streben sie in diese Lage wieder zurückzukehren. Das *indifferente* Gleichgewicht mit einiger Genauigkeit herzustellen, ist nicht leicht: man sucht die Schwungräder der Maschinen, wie überhaupt alle Körper, die sich gleichmäßig um eine Axe drehen sollen, möglichst in dieses Gleichgewicht zu versetzen. Wird endlich beim *labilen* Gleichgewichte der Körper aus seiner Lage gebracht, so entfernt er sich immer weiter aus derselben und fällt endlich um: will man ihn aufrecht erhalten, so muß man den Unterstützungspunkt immer nach der Seite nachrücken, nach welcher der Körper fallen will, wie es bei gewissen Kunststücken geschieht, die man mit dem Namen Balanciren bezeichnet. Auch der Seiltänzer ist im labilen Gleichgewichte: um sich zu erhalten, muß er seinen Schwerpunkt durch Neigen seines Körpers oder durch Verschieben eines schweren Stabes, der Balancirstange, immer wieder oberhalb des Seiles bringen, wenn sich derselbe seitlich bewegen will.

§ 2. Bestimmung des Gewichtes der Körper. — Die Wage.

Die Bestimmung des Schwerpunktes eines Körpers oder eines Systems zusammenhängender Körper ist für viele praktische Fragen für Kunst und Gewerbe von großer Wichtigkeit und findet die mannigfachsten Anwendungen: doch ebenso wichtig und nothwendig ist es, die Summe aller Anziehungskräfte der einzelnen Theilchen eines Körpers zu bestimmen, oder, um es mit einem Worte zu bezeichnen, den Körper zu wägen.

Digitized by Google

Die Instrumente, welche diesem Zwecke dienen, und welche bekanntlich Wagen heißen, sind in ihrer Gestalt und Einrichtung sehr verschieden, und wir werden einige derselben beschreiben, wenn wir die Anwendungen der Physik besprechen werden: hier beschränken wir uns auf die Beschreibung der feinen Wagen, wie sie allein bei wissenschaftlichen Untersuchungen gebraucht werden, und welche man Präcisionswagen oder chemische Wagen nennt.

Das Princip, auf dem dieselben beruhen, ist folgendes:

Unterstützt man einen Hebel, d. h. einen starren unbiegsamen Balken, in seinem Mittelpunkte so, daß er sich um diesen festen Punkt frei drehen kann, so wird derselbe im Gleichgewichte sein, sobald auf seine beiden Enden Kräfte wirken, welche einander genau gleich sind.

Soll nun ein solcher Hebel als Wage dienen, so sind bei seiner Anfertigung folgende Bedingungen zu erfüllen.

Zuerst müssen die beiden Arme des Hebels oder Wagbalkens AO und OB (Fig. 27) genau gleiche Länge und gleiches Gewicht besitzen, damit sie sich gegenseitig im Gleichgewichte halten; und ebenso müssen die beiden Wagschalen PP, von denen die eine den zu wägenden Körper, die andere die Gewichte aufzunehmen bestimmt ist, ebenfalls von gleichem Gewichte sein. Ferner muß der gemeinsame Schwerpunkt aller Theile der Wage unterhalb der Axe liegen, auf welcher der Wagbalken ruht, doch muß sein Abstand von dieser Axe sehr klein sein. Durch diese Lage wird bewirkt, daß sich die Wage im stabilen Gleichgewichte befindet, und daß sie sich nach einigen Schwingungen so einstellt, daß der Wagbalken in horizontale Lage kommt, sobald die Gewichte, welche auf beide Wagschalen gelegt wurden, genau gleich sind, sodaß die horizontale Lage des Wagbalkens das Zeichen für die Gleichheit der Gewichte ist.

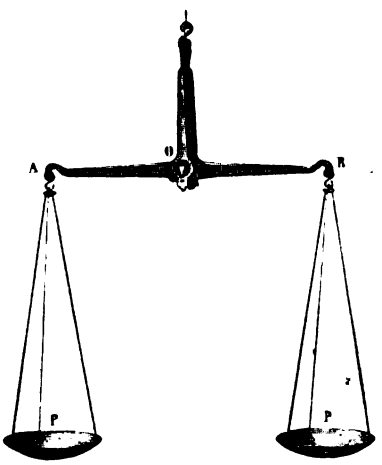


Fig. 27. Wage.

Diese Bedingungen genügen vollständig für die Richtigkeit der Wage: soll dieselbe aber zugleich auch sehr empfindlich sein, d. h. soll sie noch

Digitized by Google

sehr kleine Verschiedenheiten in den Gewichten durch eine auffällige Neigung des Wagbalkens bemerklich machen, so sind noch folgende beiden Forderungen zu erfüllen:

Erstens müssen die beiden Punkte, in denen die Schalen aufgehängt sind, mit dem Drehpunkte des Wagbalkens in einer geraden Linie liegen, wodurch die Empfindlichkeit der Wage von der Größe der Belastung der Schalen unabhängig ist; und

Zweitens muß der Wagbalken möglichst große Länge bei möglichst geringem Gewichte besitzen, wodurch der Ausschlag für ein bestimmtes Uebergewicht einen möglichst großen Werth erhält. Derselbe Grund ist auch für die oben erwähnte Forderung bestimmend, daß nämlich der Schwerpunkt dem Unterstützungspunkte möglichst nahe liegen muß, ohne jedoch vollständig mit ihm zusammenzufallen.

Wir wollen sehen, auf welche Weise die letztere Bedingung bei den chemischen Wagen erfüllt wird.

Zunächst hat der Wagbalken die Gestalt eines sehr langgestreckten Rhombus, der aus einer Platte von Stahl oder Messing herausgeschnitten ist, und aus dessen Innerem große Flächen in solcher Weise ausgespart sind, daß dadurch sein Gewicht geringer geworden ist, ohne daß sich seine Biegsamkeit vergrößert. Durch seinen Mittelpunkt geht ein Stahlprisma, dessen horizontale Schneide, welche die Drehungsaxe des Wagbalkens bildet, auf einem sehr harten und polirten Lager, etwa aus Achat, ruht. An den Enden des Wagbalkens befinden sich weiter zwei ähnliche, aber kleinere Prismen, deren Schneiden aber nach oben gerichtet sind, und auch wieder horizontal und der des ersten Prisma genau parallel sein müssen. Auf diesen Schneiden ruhen kleine bewegliche Stahlscheiben, an welchem die Stäbe befestigt sind, die die Wagschalen tragen. Die erwähnten drei Schneiden müssen genau in dieselbe Ebene fallen und gleichen Abstand von einander haben.

Oberhalb des Wagbalkens in der Mitte befinden sich zwei Knöpfe, von denen sich der obere längs einer Schraubenspindel aufwärts oder herabschrauben läßt. Sobald man nun die Lage desselben verändert, so wird dadurch zugleich der Schwerpunkt des ganzen Systems gehoben oder gesenkt, sodaß man durch seine Stellung der Wage einen beliebigen Grad von Empfindlichkeit ertheilen kann. Der untere Knopf aber trägt seitwärts eine Durchbohrung, seine Masse ist also um die Axe ungleich-

Digitized by Google

mäßig vertheilt: durch ihn kann man daher bewirken, daß die Last auf der einen oder anderen Seite etwas vergrößert wird, und daß vorübergehende Ungleichheiten, wie das Gewicht kaum wahrnehmbarer Staubkörner, ausgeglichen werden.

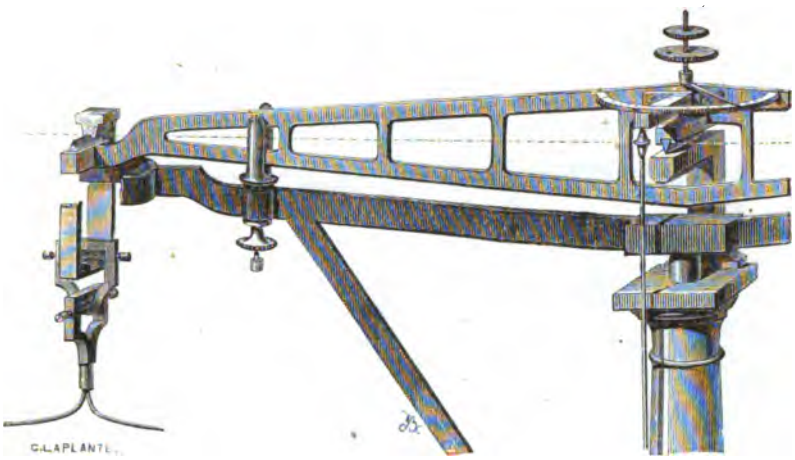


Fig. 28. Balken einer chemischen Wage.

Auf der vorderen Seite trägt der Wagbalken in der Mitte einen langen, nach unten gerichteten Metallstab oder eine Nadel, welche mit ihm schwingt und sich genau vertical einstellt, sobald die Ebene durch die drei Schneiden sich in horizontaler Lage befindet. Das untere Ende der Nadel bewegt sich über einem Kreisbogen, der auf Elfenbein verzeichnet ist, und auf welchem ein mit Null bezeichneter Theilstrich den Punkt angiebt, auf den die Nadel zeigen muß, wenn die Wage sich im Gleichgewichte befindet. Durch Theilstriche, welche sich zu beiden Seiten des Nullpunktes in gleichen Zwischenräumen befinden, läßt sich der Ausschlagswinkel beim Schwingen der Nadel ablesen: sieht man nun, daß die Nadel zu beiden Seiten vom Nullpunkte gleich weit ausschlägt, so kann man daraus schließen, daß sie, zur Ruhe gelangt, auf den Nullpunkt zeigen wird, und daß also die Gewichte auf beiden Wagschalen gleich sind.

Eine solche Wage muß auf einer unerschütterlichen Unterlage ruhen, und vor jedem Versuche muß man sich mit Hilfe einer Wasserwage, die sich auf der unteren Platte befindet, und durch Beobachtung der Nadel überzeugen, daß ihre Stellung vollständig horizontal ist. Um sich von dem Einflusse der Strömungen in der Luft unabhängig zu machen, und

Digitized by Google

um die Feuchtigkeit und andere schädliche Bestandtheile der Atmosphäre von diesem feinen Instrumente abzuhalten, schließt man dasselbe zugleich mit einer Schale voll Chlorcalcium, das die Feuchtigkeit an sich zieht, in einen Glaskasten ein, den man auch während der eigentlichen Wägung geschlossen läßt, und nur dann öffnet, wenn man die Schalen belasten will. Hat man die Wägung beendet, so hebt man den Wagbalken durch

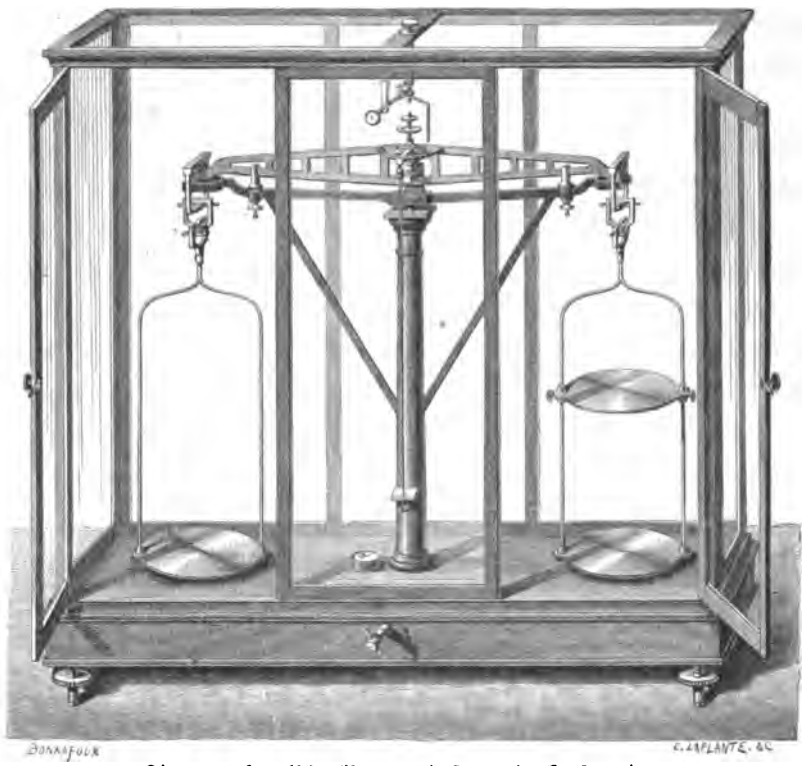


Fig 29. Chemische Wage nach Hempel's Construction.

eine Metallgabel aus, welche an einer in der Säule der Wage verborgenen Zahnstange befestigt ist, die durch ein Zahnrad mit Hilfe eines außen angebrachten Knopfes bewegt wird. Auf diese Weise schont man die Schneiden der Prismen, welche sich ohne diese Vorsichtsmaßregel durch den immerwährenden Druck bald abstumpfen würden.

So ist es denn gelungen, mit der größten Sorgfalt alle die Bedingungen zu erfüllen, welche wir weiter oben als erforderlich für die Genauigkeit einer feinen Wage aufzählten; ohne diese Genauigkeit würden aber die Wägungen für den jetzigen Stand der Physik und Chemie gar

Digitized by Google

nicht brauchbar sein. Daß aber die Güte des Instrumentes allein nicht ausreicht, sondern daß auch der Beobachter verstehen muß, mit dem Instrumente umzugehen, ist selbstverständlich. Ebenso begreift man, daß die Genauigkeit der Wage von keinem Nutzen sein würde, wenn nicht zugleich die Gewichtsstücke, die man zur Wägung benutzt, mit der größten Sorgfalt gearbeitet wären.

Außer den käuflichen Gewichten verfertigen sich viele Beobachter noch selbst kleine Gewichte aus Platindraht, die sie zuvor mit der größten Sorgfalt abwägen und dann wie kleine Reiter auf den Wagbalken setzen, um mit ihrer Hilfe das Gewicht eines Körper bis auf weniger als ein Milligramm genau zu ermitteln. Bei der oben abgebildeten, von Hempel construirten Wage sind dieselben aber überflüssig. Man bemerkt bei derselben unterhalb der beiden Knöpfe auf dem Wagbalken einen getheilten Halbkreis, auf dem sich ein horizontaler Zeiger bewegt, den man durch eine Vorrichtung, die aus den Glaskasten herausführt, drehen kann. Die Theilungen des Halbkreises entsprechen den Milligrammen, sodaß, wenn man den Zeiger z. B. auf den Theilstrich 1, 2, 3... der linken Seite einstellt, dies ebenso auf die Wage wirkt, als wenn man die linke Wagschale mit 1, 2, 3... Milligrammen belastete.

Die feinsten Wagen, die man jetzt baut, geben für ein Uebergewicht von einem Milligramm einen merklichen Ausschlag, wenn jede Schale mit fünf Kilogramm belastet ist. Mit den Wagen zur chemischen Analyse bestimmt man noch die Zehntel eines Milligrammes genau, doch muß dabei die Belastung nur gering sein, darf etwa 2 Gramm nicht übersteigen.

Die Physiker wenden häufig die Borda'sche Methode der doppelten Wägung an, durch welche das Gewicht auch dann noch richtig bestimmt wird, wenn die Arme der Wage nicht ganz genau gleich lang sein sollten: sie bringen den Körper, dessen Gewicht bestimmt werden soll, auf die eine Wagschale und tariren, indem sie auf die andere Wagschale so viel Bleischrot legen, daß es den Körper im Gleichgewicht hält. Sind nun die Arme der Wage nicht genau gleich lang, so folgt aus diesem Gleichgewichte noch nicht, daß der Körper und der Bleischrot gleiches Gewicht besitzen. Entfernt man nun aber den Körper von der Wagschale und ersetzt ihn durch so viele Gewichtsstücke, daß dieselben wieder dem Bleischrot die Wage halten, so ist leicht einzusehen, daß sie das genaue Ge-

Digitized by Google

wicht des Körpers angeben, da sie genau dasselbe, als der Körper, unter genau gleichen Umständen bewirken.

Wir werden später ausführlich davon sprechen, daß sich das Gewicht eines Körpers vermindert, sobald derselbe in eine Flüssigkeit oder ein Gas eingetaucht ist, und zwar beträgt der Gewichtsverlust genau so viel, als die Menge der Flüssigkeit oder des Gases wiegt, die durch ihn aus ihrer Stelle verdrängt ist. Da sich nun der Rauminhalt eines Körpers mit der Temperatur ändert, so wird er auch nicht immer dieselbe Flüssigkeitsmenge verdrängen: hieraus ergiebt sich, daß man diese Aenderungen mit in Rechnung ziehen muß; es müßte denn möglich sein, die Wägung im luftleeren Raume vorzunehmen.

Als Gewichtseinheit wählt man jetzt ganz allgemein die aus dem metrischen Systeme abgeleitete, nämlich das Kilogramm. Will man die Erklärung in aller Ausführlichkeit und Strenge geben, so muß man sagen: Ein Kilogramm ist das Gewicht von einem Kubikdecimeter destillirten Wassers, welches im luftleeren Raume bei 4° des hunderttheiligen Thermometers über dem Nullpunkte, in der geographischen Breite von 45° und am Meeresspiegel abgewogen ist. Hierbei muß man sich aber daran erinnern, daß die Gewichtsveränderungen, die eintreten, wenn wir uns in andere geographische Breite oder in andere Höhe über den Meeresspiegel begeben, durch die Wage nicht wahrgenommen werden können, da ihr Einfluß auf die Gewichte in beiden Wagschalen genau derselbe ist. Deshalb darf man dieselben bei Anwendung der Wage nicht mit in Rechnung ziehen.

Zum Schlusse dieses Kapitels wollen wir noch erklären, was man unter dem specifischen Gewichte und der Dichtigkeit der Körper versteht: wie man diese Größen experimentell bestimmt, davon sprechen wir später. Nimmt man gleiche Volumina von verschieden Stoffen, so haben dieselben durchaus nicht gleiches Gewicht: wie Jedermann weiß, wiegt ein Steinblock mehr, als ein gleich großes Stück Holz, weniger, als ein eben solches Stück Eisen. Nimmt man nun von jedem dieser Stoffe ein Stück, dessen Größe der Einheit des Rauminhalts, z. B. einem Kubikdecimeter gleich ist, und wägt es bei gleicher Temperatur, so erhält man Zahlenwerthe, welche man als die specifischen Gewichte der Stoffe bezeichnet.

Wollte man für das Gewicht oder den Rauminhalt andere Einheiten

Digitized by Google

wählen, so würde man auch für die specifischen Gewichte andere Zahlenwerthe finden: das Verhältniß dieser Zahlen aber würde ungeändert dasselbe bleiben. Daher ist man übereingekommen, einen bestimmten Stoff als Einheit zu wählen und auf sein specifisches Gewicht die aller anderen Stoffe zu beziehen: und man hat sich für das Wasser als Einheit entschieden, weil dasselbe über die ganze Erde verbreitet ist und sich mit Leichtigkeit rein darstellen läßt. Werden die specifischen Gewichte auf diese Weise ausgedrückt so heißen sie relative specifische Gewichte.

Stellt man dieselbe Vergleichung bezüglich der Massen der Stoffe, die in der Raumeinheit enthalten sind, an, so erhält man ihre relative Dichtigkeit. Da die so erhaltenen Werthe mit dem für die specifischen Gewichte erhaltenen übereinstimmen, so werden beide Begriffe oft mit einander verwechselt und mit dem gemeinsamen Namen der Dichtigkeit bezeichnet, was jedoch nicht ganz correct ist.

Fünftes Kapitel.

Wirkung der Schwerkraft auf Flüssigkeiten.

§ 1. Eigenschaften der flüssigen Körper.

Alltäglich treten die merkwürdigsten Erscheinungen vor unsere Augen, welche es wohl verdienten, daß wir ihnen unsere Aufmerksamkeit widmen, und dennoch schenken wir ihnen kaum eine flüchtige Beachtung, geschweige denn, daß wir uns über die Bedingungen, unter denen sie eintreten, Rechenschaft ablegten. Dazu gehören z. B. die verschiedenen Formen, in welchen die Körper erscheinen, indem sie sich bald im festen, bald im flüssigen, oder luftförmigen Zustande befinden, bald diese drei Erscheinungsformen, welche man Aggregatzustände nennt, nach einander durchlaufen. Worin besteht denn eigentlich der Unterschied zwischen Eis und Wasser, und was erfolgt, wenn sich letzteres in Dampf verwandelt? Welche Veränderung muß wohl in der Anordnung der kleinsten Theilchen oder Molecüle eines Körpers vor sich gehen, wenn derselbe den einen dieser Zustände mit dem andern vertauscht: wenn er schmilzt oder verdunstet, oder umgekehrt, wenn er erstarrt oder sich aus der Dampfform verdichtet und niederschlägt? Das sind Fragen, auf welche die Wissenschaft nur allmählich und fast schüchtern anfängt, bestimmte Antworten

Digitized by Google

zu ertheilen, da nur eine geringe Zahl von Erscheinungen, deren Beobachtung noch mit mancherlei Schwierigkeiten zu kämpfen hat, diese schwere Aufgabe ihrer Lösung näher zu bringen vermag. Später werden wir einige dieser Vorgänge in diesem Buche besprechen: jetzt aber wollen wir uns auf das beschränken, was zum Verständnisse der Erscheinungen, auf die wir zunächst eingehen, nothwendig ist.

Die Grundeigenschaft der *festen* Körper ist die Beständigkeit ihrer Gestalt, welche sich nur ändert, wenn äußere mechanische Kräfte einen Druck oder Zug auf sie ausüben, oder wenn andere physikalische Kräfte sie in einen anderen Zustand hinüberführen wollen. Bei einem Steine oder Metallstücke hängen die Theilchen so fest an einander, daß sie ihre gegenseitige Entfernung und Lage nicht ändern und sich nur unter der Einwirkung mehr oder weniger starker äußerer Kräfte von einander trennen lassen. Hieraus folgt, daß in ihnen der Schwerpunkt eine unveränderliche Lage besitzt, und daß, wenn der Körper irgend eine Bewegung im Raume macht, wenn er geworfen wird, oder unter dem Einflusse der Schwerkraft frei herabfällt, alle seine Theilchen gleichzeitig und in gleicher Weise an der Bewegung theilnehmen. Es besteht also eine Kraft, welche die einzelnen Theilchen fest mit einander verbindet, und diese Kraft heißt *Cohäsion*.

Zertheilt man einen festen Körper in sehr kleine Stücke, in sehr feinen Staub, so scheint die Cohäsion vernichtet, oder doch wenigstens sehr stark vermindert zu sein. So hält es sehr schwer, einen Sandhaufen in Form eines spitzen Kegels aufzurichten: die Körner gleiten längs der Böschung in ähnlicher Weise über einander herab, in welcher eine Flüssigkeit längs eines Abhanges herabfließt. Die Aehnlichkeit der Vorgänge wird noch größer, wenn man ein Gefäß, dessen Boden durchbohrt ist, mit sehr feinem Sande füllt: der Ausfluß erfolgt, als ob die Masse flüssig wäre (Fig. 30). Und doch ist diese Aehnlichkeit nur scheinbar, denn jedes einzelne Sandkorn, so klein es auch sei, theilt doch die Eigenschaften fester Körper vollständig und unterscheidet sich in keiner Beziehung von denselben.

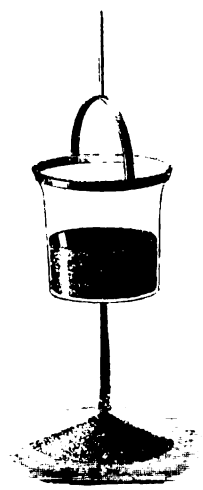


Fig. 30. Ausfluß fein zertheilter Massen.

Digitized by Google

Welches ist denn also das Kennzeichen, durch das sich feste und flüssige Körper unterscheiden?

Dieser Unterschied besteht nur in dem verschiedenen Grade der Cohäsion, welche bei den festen Körpern so groß ist, daß sie die gegenseitige Bewegung der Theilchen hindert, während sie bei den Flüssigkeiten einen weit geringeren Grad besitzt. Daher auch die unendliche Beweglichkeit ihrer Theilchen, welche, schon durch die geringste Kraft getrieben, über und an einander rollen und gleiten. Diese Beweglichkeit hindert auch die Flüssigkeiten, eine bestimmte Gestalt anzunehmen: deshalb fügen sich dieselben immer in die Formen der Gefäße, in denen sie sich befinden und deren Wände sie hindern, der Schwerkraft Folge zu leisten.

Die Cohäsion ist dabei aber durchaus noch nicht vollständig verschwunden: denn wenn eine Flüssigkeitsmasse in Bewegung ist, so verändern die Theilchen zwar ihren Platz, aber sie verlieren ihren Zusammenhang nicht und lösen sich nicht so von einander, wie die Körner einer Sandmasse; auch ihre gegenseitige Entfernung bleibt ungeändert und daher bleibt bei aller Formveränderung ihr Volumen von gleicher Größe. Bringt man auf die Oberfläche einer Flüssigkeit eine Platte, welche von jener benetzt wird (Fig. 31), so ist eine gewisse Kraft erforderlich um die Platte abzuheben: ist dies geschehen, so findet man auf der Oberfläche der Platte eine dünne Schicht der Flüssigkeit, woraus man schließen muß, daß jene Kraft erforderlich war um den Zusammenhalt oder die Cohäsion der Flüssigkeitstheilchen zu überwinden. Ebenso bleibt an einem Stabe, den man in eine Flüssigkeit taucht und wieder zurückzieht, am unteren Ende ein Tropfen hängen. Für das Vorhandensein der Cohäsion ist auch die Kugelform, welche Thautropfen oder kleine Mengen Quecksilber, die auf

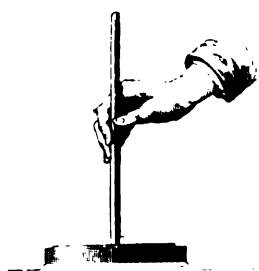


Fig. 31. Cohäsion der Flüssigkeiten.

Fig. 32. Kugelform der Thautropfen.

Digitized by Google

eine Tischplatte gespritzt sind (Fig. 32 und 33), annehmen, ein Beweis: denn ohne dieselbe würden sich die flüssigen Massen in Folge der Anziehung der Erde über die Oberflächen, auf denen sie ruhen, ausbreiten müssen; daß dies nicht geschieht, beweist, daß eine andere Kraft die Wirkung der Schwerkraft in diesen Fällen überwindet. Daß die Cohäsion der Flüssigkeiten nicht groß ist, sieht man aus der Leichtigkeit, mit welcher sich dieselben theilen lassen: auch schon der Widerstand der Luft genügt, wie schon erwähnt, die Cohäsion von Wassermassen, die aus großer Höhe herabfallen, zu überwinden und zu bewirken, daß sich dieselben in sehr feinen Staub auflösen.

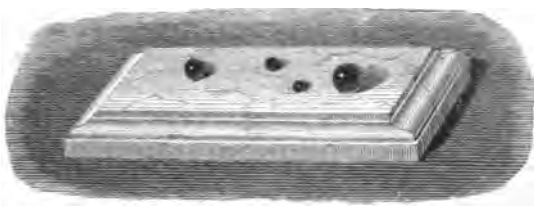


Fig. 33. Cohäsion der Flüssigkeiten; Quecksilbertropfen.

Bei den verschiedenen Flüssigkeiten zeigen sich auch verschiedene Grade der Cohäsion; so giebt es klebrige Stoffe, wie die Harze und der Schwefel bei gewissen Temperaturgraden, deren Theilchen nur langsam ihre Lage ändern und erst nach einiger Zeit die Form der Gefäße annehmen, in denen sie sich befinden. Man könnte sogar die weichen Körper als Uebergangsform zwischen dem festen und flüssigen Zustande ansehen*). Andere Körper wie Aether und Alkohol, besitzen dagegen einen sehr hohen Grad von Flüssigkeit, so wie sie sich auch sehr leicht in Dampf verwandeln; das Wasser und einige andere halten bezüglich dieser Eigenschaften die Mitte zwischen jenen Extremen. Daß Wärme und Druck einen sehr großen Einfluß auf diese Verhältnisse ausüben, werden wir später sehen.

Die Erscheinungen, welche wir jetzt besprechen wollen, zeigen sich bei allen Flüssigkeiten in höherem oder geringerem Grade, je nachdem die Beweglichkeit der Theilchen mehr oder minder vollkommen ist; der Unterschied besteht nur in der Zeit, welche zum Eintritt der Erscheinungen

*) Auch die Cohäsion der festen Körper kann durch genügenden Druck überwunden werden: so hat Tresca durch sehr interessante Versuche bewiesen, daß die härtesten und dichtesten Körper durch sehr starken Druck dazu gebracht werden können, eine Bewegung anzunehmen, die sich von der Bewegung des Fließens nicht wesentlich unterscheidet; und zwar geschieht dies, ohne daß sich der Aggregatzustand der Körper ändert.

Digitized by Google

erforderlich ist, weshalb wir auf den Grad der Beweglichkeit jetzt nicht mehr Rücksicht nehmen wollen.

§ 2. Gesetz der Ausgleichung des Druckes.

Um zu untersuchen, ob sich das Wasser und andere Flüssigkeiten durch starken Druck auf einen kleineren Raum zusammenpressen lassen, stellten die Physiker der Academia del Cimento zu Florenz am Ende des 18. Jahrhunderts Versuche an, durch welche jene Frage verneint zu werden schien. Sie ließen nämlich eine hohle Silberkugel anfertigen, welche sie mit Wasser füllten und darauf luftdicht verschlossen. Als sie nun diese Kugel einem hohen Drucke aussetzten, so sahen sie, daß das Wasser durch ihre Wände hindurch sickerte; und, da auch andere Versuche zu demselben Resultate führten, so schlossen sie daraus, daß sich die Flüssigkeiten selbst durch die größte mechanische Gewalt nicht auf einen kleineren Raum zusammendrücken lassen.

Spätere Versuche haben gezeigt, daß die Beobachtungen der Akademiker von Florenz nicht ganz genau waren, und so haben verschiedene Physiker, wie Canton 1761, Perkins 1819, Oerstedt 1823 und später Despretz, Colladon, Sturm, Westheim und Regnault mit immer größerer Genauigkeit gemessen, bis zu welchem Grade verschiedene Flüssigkeiten durch einen bestimmten Druck zusammengepreßt werden. Bei allen diesen Versuchen hat sich gezeigt, daß diese Volumenänderung sehr klein ist, so daß man sie beim Studium der Gleichgewichts-Erscheinungen der Flüssigkeiten, zu denen wir jetzt übergehen wollen, vollständig vernachlässigen darf.

Werden zwei aufrecht stehende Cylinder, welche verschiedene Weite besitzen, an ihrem Grunde durch eine Röhre verbunden, mit Wasser gefüllt und durch genau passende Kolben geschlossen, so zeigt der Versuch, daß die Kolben in gleicher Höhe im Gleichgewicht bleiben, sobald sie so belastet sind, daß die Gewichte, welche beiderseits auf die Wasserfläche drücken, im Verhältniß der Oberflächen stehen. Ist z. B. der Querschnitt des weiteren Cylinders (Fig. 34) 16 mal so groß als der des engeren, und

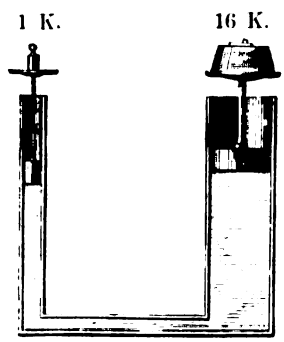


Fig. 34. Princip der hydraulischen Presse.

Digitized by Google

beträgt das Gewicht des Kolbens des engeren 1 Kgr., so muß man den größeren Kolben so belasten, daß das Gesammtgewicht 16 Kgr. beträgt, ehe das Gleichgewicht hergestellt ist.

Dieser Versuch zeigt, daß sich der Druck, der durch den kleineren Kolben auf dem Wasser lastet, durch die Flüssigkeit ungeändert fortpflanzt, sodaß jeder einzelne Theil der Oberfläche des größeren Kolben, der an Fläche dem kleineren Kolben gleich ist, von unten her einen jenem Gewichte gleichen Druck erleidet. Auf diesem Principe beruht eine, in der Industrie angewendete, sehr nützliche Maschine, die hydraulische Presse.

Pascal fand zuerst dieses Princip, welches eine nothwendige Folge der Beweglichkeit und Elasticität der Flüssigkeit ist, und welches man folgendermaßen aussprechen kann:

Jeder Druck, der auf eine von allen Seiten in ein Gefäß eingeschlossene Flüssigkeit ausgeübt wird, pflanzt sich durch dieselbe nach allen Richtungen hin in gleicher Stärke fort. Dies ist so zu verstehen, daß, wenn man in der Wand des Gefäßes Stellen ins Auge faßt, welche dieselbe Oberfläche besitzen, wie der Theil, auf welchem der Druck lastet, dieselben von Innen her einen Druck erleiden, welcher dem ursprünglichen Drucke von Außen vollständig gleich ist; sucht man dagegen den inneren Druck auf ein Flächenstück, das doppelt, dreimal, viermal so groß ist u. s. w., als das Stück, auf welchem der Druck von Außen lastet, so findet man jenen ebenfalls doppelt, dreimal, viermal so groß.

Bringt man daher in den Wänden eines vollständig geschlossenen und mit Flüssigkeit gefüllten Gefäßes Oeffnungen von beliebiger Weite an, so muß man, wenn Gleichgewicht stattfinden soll, auf die Kolben, welche die Oeffnungen schließen, Druckkräfte wirken lassen, die sich wie die Flächen der Oeffnungen verhalten (Fig. 35). Bei dieser Ueberlegung haben wir noch vollständig vom eigenen Gewichte der Flüssigkeit abgesehen: will man den Satz also anwenden oder durch den Versuch bestätigen, so ist es nothwendig, daß man auch den Druck in Rechnung zieht, den die Flüssigkeit infolge ihres Gewichtes

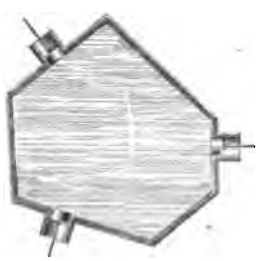


Fig. 35. Der Druck, der auf einen Punkt einer Flüssigkeit ausgeübt wird, pflanzt sich gleichmäßig nach allen Richtungen hin fort.

Digitized by Google

auf ihre eigenen Theilchen, wie auf die Wände des Gefäßes, ausübt. Daß bei der hydraulischen Presse (Fig. 34) das Pascal'sche Princip zur Anwendung kommt, ist leicht zu sehen.

Wir haben früher den Versuch erwähnt, durch welchen der Beweis geführt wurde, daß das Bleiloth immer senkrecht gegen die Oberfläche einer ruhenden Flüssigkeit gerichtet ist (s. Fig. 4): jetzt können wir den Grund dieser Erscheinung verstehen.

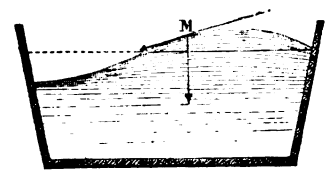


Fig. 36. Die Oberfläche ruhender Flüssigkeiten ist horizontal.

Nehmen wir an, daß die Oberfläche einer flüssigen Masse nicht eine horizontale Ebene bildete, so würde sich z. B. das Theilchen M (Fig. 36) gleichsam auf einer schiefen Ebene befinden und infolge seines eigenen Gewichtes bei der großen Beweglichkeit der Flüssigkeitstheilchen längs dieser Ebene herabgleiten; so kann sich das Gleichgewicht nicht eher herstellen, als bis die Oberfläche an keiner Stelle noch irgend welche Neigung zeigt, bis sie also die Form einer horizontalen Ebene, die man ihr Niveau nennt, angenommen hat. Die großen Oberflächen der Meere, Seen, ja selbst der Teiche sind selten in Ruhe; die Bewegungen der Luft, mögen es nun gewaltige Stürme oder leichte Brisen sein, genügen schon, um jene beweglichen Erhebungen zu erzeugen, die man als Wogen und Wellen bezeichnet. Umfaßt man aber mit dem Auge, oder wenigstens mit dem Geiste, nicht einen beschränkten Raum, sondern eine Fläche von bedeutendem Halbmesser, begiebt man sich z. B. durch den Luftballon in großen Abstand, so verschwinden diese Erhebungen in ihrer Gesammtheit, das Wasser scheint in Ruhe zu sein und eine ebene und horizontale Oberfläche zu besitzen.

Je mehr sich aber in dieser Weise unser Blick erweitert, um so mehr müssen wir uns auch erinnern, daß die Erde nahezu kugelförmig ist, daß die Lothlinien an verschiedenen Orten nicht genau parallel sind, und daß folglich auch die wahre Oberfläche der Meere und Seen an dieser Krümmung theilnehmen muß. Wollten wir annehmen, daß das feste Land einmal verschwinde und daß alles vom Wasser bedeckt sei, so würde die Oberfläche des Wassers die Kugelform besitzen, ja, wenn wir es ganz genau nehmen wollen, so muß sie sogar die Abplattung zeigen. Diese Oberfläche können wir uns unter den Ländern fortgesetzt

Digitized by Google

denken: wir nennen sie den Meeresspiegel oder das Niveau des Meeres und beziehen auf sie alle Höhenangaben.

Somit haben wir gesehen, wie sich die äußere Oberfläche einstellt: fragen wir jetzt, was im Innern der Flüssigkeit vorgeht. Da jedes Theilchen der Schwerkraft unterworfen ist, so kann sein Gewicht als eine Druckkraft angesehen werden, die ihre Wirkung auf alle Theilchen der Flüssigkeit nach allen Seiten hin ausübt und so auch bis nach den Wänden des Gefäßes hin wirkt. Welches ist nun die Gesammtwirkung aller dieser Druckkräfte? Ein Versuch wird es uns zeigen.

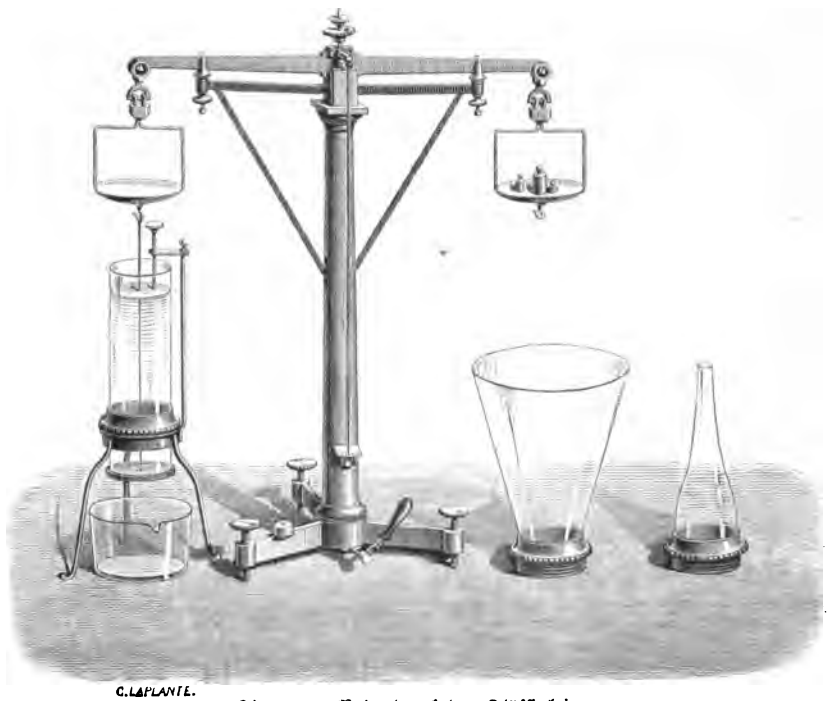


Fig. 37. Bodendruck der Flüssigkeiten.

Wir nehmen ein cylindrisches Gefäß, das unten offen ist (Fig. 37) und von einem Dreifuß in bestimmter Höhe gehalten wird: den Boden bilden wir durch eine genau anschließende Metallscheibe, die an einem Faden hängt, welcher an dem einen Arme einer Wage befestigt ist. Man bringt zunächst auf die entgegengesetzte Wagschale eine Tara, welche die Metallscheibe gerade im Gleichgewichte hält, fügt außerdem noch ein Uebergewicht von bestimmter Größe hinzu, durch das die Scheibe an den Cylinder fest angedrückt wird, und fängt endlich an, Wasser in den

Digitized by Google

Cylinder zu gießen. Je mehr die Wassermenge wächst, desto stärker drückt sie auch gegen die Bodenplatte, und es wird endlich der Punkt erreicht werden, an dem ihr Gewicht dem Uebergewicht gleich ist: gießt man noch ein wenig zu, so wird die Bodenplatte durch den Druck gelöst und das Wasser beginnt bei ihr auszufließen. Allein dadurch wird die Massermenge, und damit auch der Druck wieder geringer, sodaß sich nun die Bodenplatte, durch das Uebergewicht gehoben, dem Cylinder wieder anschließt, sodaß es möglich ist, sehr genau den Punkt zu bestimmen, bis zu welchem das Wasser stehen darf, wenn es durch das Gewicht noch gehalten werden soll. Dieser Punkt wird durch eine Spitze bezeichnet, die man bis an den Wasserspiegel herabschraubt. Läßt man nunmehr das Wasser in ein Gefäß abfließen und bestimmt man sein Gewicht, so findet man, wie zu erwarten war, durch den Versuch, daß *der Druck einer Flüssigkeit auf den Boden eines cylindrischen Gefäßes dem Gewichte der Flüssigkeit gleich ist.*

Wiederholt man nunmehr denselben Versuch mit einem Gefäße, welches dieselbe Bodenfläche hat, wie der Cylinder, sich aber nach oben erweitert, sodaß sein Rauminhalt größer ist, so findet man, daß dieses Gefäß auch wieder genau bis zu derselben Höhe angefüllt werden muß, ehe die Bodenplatte losgedrückt, also das Gewicht überwunden wird. Endlich giebt ein Gefäß, das sich oben verengert, genau dasselbe Resultat, immer vorausgesetzt, daß es gleiche Bodenfläche besitzt.

Durch diese Versuche ist bewiesen, daß der Druck, den eine Flüssigkeit auf den Boden ausübt, von der Gestalt des Gefäßes unabhängig ist und nur von der Größe der Bodenfläche und der Höhe, in der sich der Spiegel der Flüssigkeit über dem Boden befindet, abhängt: *dieser Druck ist gleich dem Gewichte einer Flüssigkeitssäule, welche die Bodenfläche als Grundfläche hat, und deren Höhe gleich dem Abstande des Niveau von der Bodenfläche ist.*

Der erste Theil dieses Gesetzes läßt sich auch durch den Haldat'schen Apparat (Fig. 38) zeigen; nur erhält man bei demselben das Maß des Druckes nicht direct, wie bei der vorerwähnten Methode, indem bei diesem Apparate der Druck dadurch gemessen wird, daß eine Quecksilbersäule in einer aufwärts gekrümmten Röhre hinaufgepreßt wird, wie aus Fig. 38 deutlich zu ersehen ist.

Digitized by Google

Wollte man weiter den Druck untersuchen, den eine Flüssigkeit auf eine Fläche in ihrem Innern oder auf einen Theil der Seitenwand ausübt, so würde man für diesen auch wieder genau denselben Werth finden, d. h. man würde finden, daß er gleich dem Gewichte einer Flüssigkeitssäule ist, welche die Fläche, für welche wir den Druck suchen, als Grundfläche hat, deren Höhe aber gleich der Tiefe ist, in der sich die Fläche unter dem Spiegel der Flüssigkeit befindet.

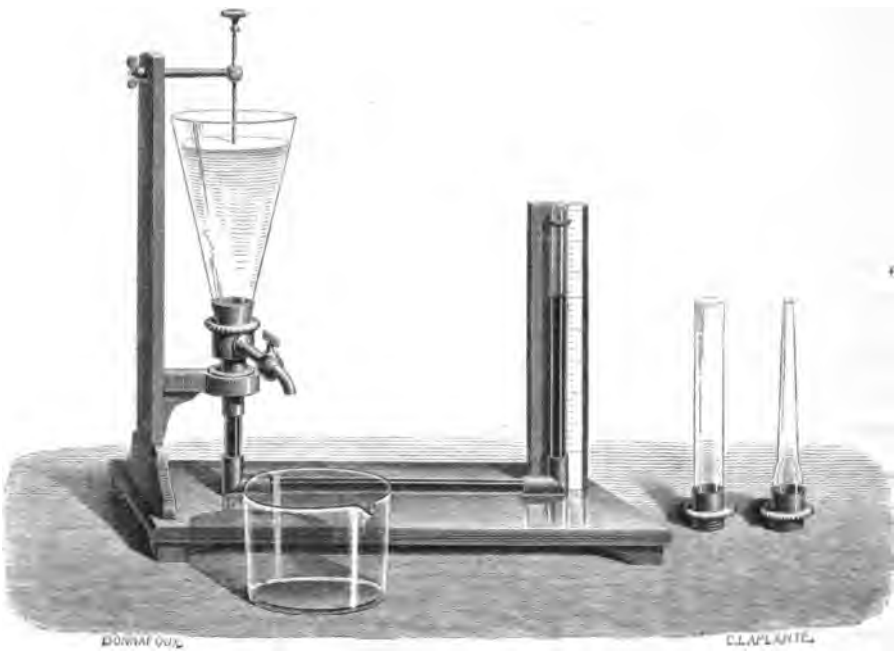


Fig. 38. Bodendruck der Flüssigkeiten; Haldat's Apparat.

Endlich kann man durch folgenden Versuch den Druck bestimmen, den eine Flüssigkeit von unten her gegen den Boden eines eingetauchten Körpers ausübt:

Man taucht eine beiderseits offene Röhre, deren Boden durch eine lose schwere Platte gebildet wird, senkrecht unter Wasser, während man die Bodenplatte mit Hülfe eines Faden fest anzieht (Fig. 39), so wird man schon mit der Hand fühlen, daß man einen gewissen Widerstand zu überwinden hat, daß also das Wasser den Körper nach oben zu drängen sucht. Hat man eine gewisse Tiefe erreicht, so kann man den Faden loslassen, und es wird dennoch die Platte nicht herabfallen: sie

Digitized by Google

wird durch den Druck, den die Flüssigkeit von unten her ausübt, gehalten. Gießt man nun Wasser in die Röhre, so wird sich die Platte von der Röhre lösen, sobald das Gewicht des eingegossenen Wassers und das Gewicht der Platte die Größe des Druckes übersteigt. Dasselbe wird auch stattfinden, wenn die Röhre nicht tief genug eingetaucht ist. Bestimmt man nun die Oberfläche und das Gewicht der Platte, und sucht man weiter die Tiefe, bis zu welcher man die Röhre eintauchen muß, wenn die Platte gerade noch gehalten werden soll, so weiß man, daß in dieser Tiefe der Druck der Flüssigkeit gegen die Platte dem Gewichte derselben genau gleich ist; und man hat in dieser Weise auch in diesem Falle das obige Gesetz bestätigt gefunden, wonach sich der Druck aus Grundfläche und senkrechtem Abstande vom Spiegel berechnen läßt.

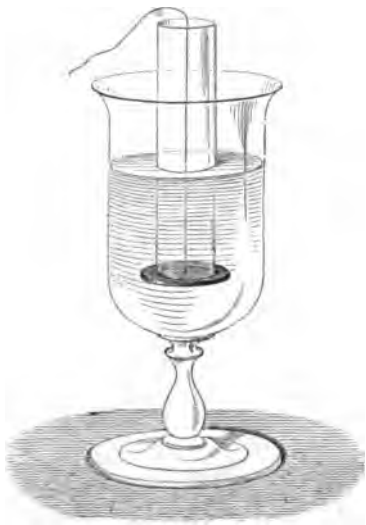


Fig. 39. Druck des Wassers von unten gegen eine horizontale Fläche.

Der Druck gegen die Wände eines Gefäßes, der, wie schon erwähnt, ebenfalls in derselben Weise berechnet werden kann, ist stets gegen die Wandfläche senkrecht gerichtet, so daß er z. B. eine der Schwerkraft gerade entgegengesetzte Richtung hat, wenn die Wandfläche horizontal ist und sich oberhalb der Flüssigkeit befindet. Um dies zu zeigen, benutzt man eine Röhre (Fig. 40), an deren unterem Ende sich eine Metallkugel befindet, deren dünne Wand an vielen Stellen feine Durchbohrungen besitzt. Wird die Röhre mit Wasser gefüllt, so spritzt dasselbe aus jeder Oeffnung in einer Richtung, die auf dem benachbarten Stücke der Wand senkrecht steht. Hierdurch erklärt es sich auch, warum das Wasser durch die Brausen der Gießkanne so weit zerstreut wird.

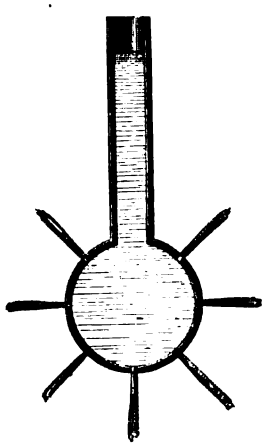


Fig. 40. Der Druck der Flüssigkeit erfolgt senkrecht zu den Wänden.

Digitized by Google

Die Wirkung des Seitendruckes der Flüssigkeiten läßt sich weiter durch das Segner'sche Wasserrad (Fig. 41) anschaulich machen: dasselbe besteht aus einem Gefäße, welches um eine aufrechte Axe drehbar ist und an seinem unteren Theile mit einer horizontalen Röhre in Verbindung steht, die an beiden Enden im entgegengesetzten Sinne umgebogen und offen ist. Ist das Gefäß mit Wasser gefüllt und sind die Oeffnungen an den Enden der Röhre verstopft, so wird das Gefäß in Ruhe bleiben, da der Druck gegen die Pfropfen durch den Druck gegen die Biegung der Röhre ausgeglichen wird: werden dagegen die Pfropfen entfernt, sodaß nun das Wasser in zwei Strahlen aus der Röhre ausfließt, so wird sich für den Druck in den Biegungen der Röhre kein Gegendruck ergeben und das Gefäß wird in eine drehende Bewegung gerathen.

Fig. 41. Segner'sches Wasserrad.

Aus dem Drucke, der immer senkrecht auf den Wandflächen lastet, erklärt sich auch die oben erwähnte, auf den ersten Blick eigenthümliche Erscheinung, daß der Druck auf den Boden der Gefäße von der mannigfaltigsten Gestalt bei gleicher Bodenfläche und gleicher Höhe des Wasserspiegels immer von gleicher Größe ist. Denn, ist das Gefäß nach oben kegelförmig erweitert, so tragen die schrägen Seitenwände das Gewicht der Wassermasse, welche außerhalb des Cylinders liegt, dessen Gewicht dem Bodendrucke gleich ist, d. h. des

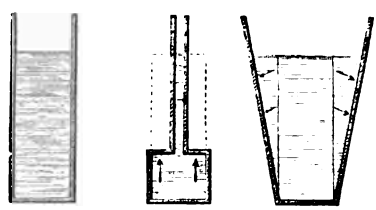


Fig. 42. Hydrostatisches Paradoxon.

Digitized by Google

Cylinders, dessen Grundfläche gleich der Bodenfläche ist, und der bis an den Wasserspiegel hinaufreicht: verengert sich dagegen das Gefäß nach oben, so erleiden die Wände einen Gesammtdruck, der der Richtung der Schwerkraft gerade entgegenwirkt, und an Größe dem Gewichte der Wassermasse gleich ist, die zur Erfüllung jenes Cylinders noch fehlt (Fig. 42).

So läßt sich die merkwürdige Erscheinung erklären, daß Flüssigkeitsmengen, deren Gewicht sich mit Hülfe der Wage als sehr verschieden ergiebt, doch bei gleicher Höhe auf die Einheit der Bodenfläche der Gefäße gleichen Druck ausüben. Von dieser Erscheinung, welche man als das hydrostatische Paradoxon bezeichnet, hat Pascal eine merkwürdige Anwendung gemacht: er sprengte die Dauben einer sehr festen Tonne dadurch, daß er auf dem Spundloche eine sehr enge und sehr lange Röhre errichtete und dieselbe, ebenso wie die Tonne mit Wasser füllte, dadurch also, daß er zum Gewichte des Wassers in der Tonne nur noch eine verhältnißmäßig sehr geringe Wassermenge in der Röhre hinzufügte (Fig. 43). Dabei hatten aber die Wände der Tonne einen Druck auszuhalten gleich dem

Fig. 43. Hydrostatisches Paradoxon: Pascal sprengt eine Tonne.

Digitized by Google

Gewichte einer Wassersäule, welche die Oberfläche der Tonne zur Grundfläche und die Länge der Röhre zur Höhe hat: so kann man mit einem Kilogramm Wasser einen Druck von Tausenden von Kilogrammen hervorbringen.

Bringt man in ein Gefäß mehrere Flüssigkeiten, die sich nicht mischen, z. B. Quecksilber, Wasser und Oel, so lagern sich dieselben nach ihrer Dichtigkeit über einander, und dabei sind die Flächen, in denen sie sich berühren, horizontale Ebenen (Fig. 44). Das letztere Ergebniß ließ sich voraussehen, denn da eine einzelne Flüssigkeit, wie wir gesehen haben, eine horizontale Oberfläche besitzt, wenn sie für sich allein in einem Gefäße im Gleichgewichte ist, so kann dieses Gleichgewicht auch nicht gestört werden, wenn der Druck einer zweiten Flüssigkeit gleichmäßig auf allen Punkten ihrer Oberfläche lastet. Mit einiger Vorsicht gelingt es auch das Gleichgewicht dadurch herzustellen, daß man die specifisch schwerere auf die Oberfläche der leichteren bringt, wenn die Verschiedenheit der Dichtigkeit nicht bedeutend ist: dann ist aber das Gleichgewicht ein labiles, und die geringste Erschütterung genügt, um die natürliche Reihenfolge der Dichtigkeiten wieder herzustellen.

Fig. 44. Gleichgewicht der Flüssigkeiten von verschiedener Dichtigkeit.

Da das Meerwasser durch seinen Salzgehalt schwerer ist, so kommt es z. B. in den Fjorden Norwegens vor, daß das süße Wasser der Flüsse in einer dicken Schicht auf der Oberfläche des Meerwassers stehen bleibt, ohne sich mit demselben zu vermischen. So berichtet Vogt, daß er in dem einen Fjord eine solche Schicht beobachtet hat, die eine Dicke von $1{,}30^{m}$ besaß. Ebenso hat man in der Themse in ziemlicher Entfernung von der eigentlichen Mündung einen Untergrund von Salzwasser gefunden, welcher durch die Fluth immer wieder erneuert wird. Natürlich kann diese Erscheinung nur bei sehr großer Ruhe der Gewässer eintreten, und jede Aufregung des Meeres durch den Wind wird sehr bald die Mischung des süßen und salzigen Wassers bewirken.

Wie wir gesehen haben, stellt sich unter dem Einflusse der Schwerkraft die Oberfläche einer Flüssigkeit ganz unabhängig von der Form

Digitized by Google

des Gefäßes in allen Theilen horizontal ein: hieraus folgt nothwendig, daß, wenn mehrere Gefäße mit einander unterhalb des Wasserspiegels in Verbindung stehen oder communiciren, das Niveau des Wassers sich in allen in gleicher Höhe befindet, wie sich sehr leicht durch den Versuch zeigen läßt, vorausgesetzt, daß es unter den Gefäßen nicht solche von sehr kleinem Durchmesser giebt (Fig. 45).

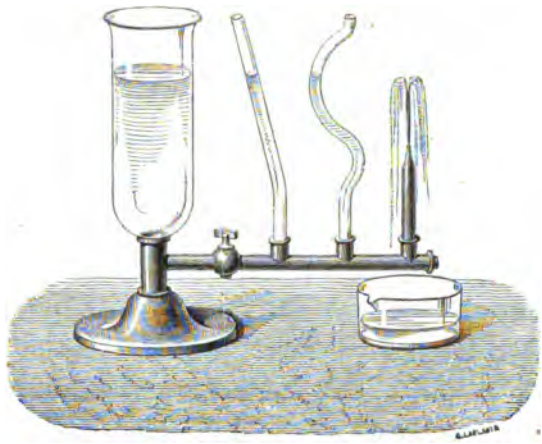


Fig. 45. Gleiche Höhe des Niveau in communicirenden Gefäßen.

Dasselbe Princip kommt auch bei den Springbrunnen, den artesischen Brunnen und den Wasserleitungen der Städte zur Anwendung. Bei den artesischen Brunnen kommt das Wasser, das in Form eines Strahles aus der Erde spritzt, oft aus sehr großen Entfernungen; es dringt gleich einem unterirdischen Flusse durch die Schichten des Bodens und tritt an die Oberfläche an einem Punkte, der tiefer liegt, als das Niveau an seinem Ursprunge. Man sieht hieraus, daß sich der Druck auf große Entfernungen hin fortpflanzt; und es müßte der Strahl bis zur Höhe des ursprünglichen Niveau aufsteigen, wenn nicht die Reibung die Geschwindigkeit verzögerte und der Widerstand der Luft die Steigkraft verrringerte. Dasselbe findet bei

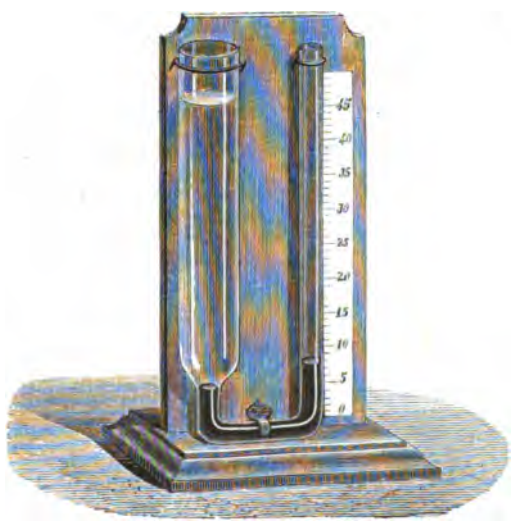


Fig. 46. Communicirende Gefäße. Höhe der Flüssigkeiten von verschiedener Dichtigkeit.

Digitized by Google

Springbrunnen statt, die durch unterirdische Röhren aus höher gelegenen Behältern gespeist werden.

Befinden sich in zwei communicirenden Gefäßen Flüssigkeiten von verschiedener Dichtigkeit, so ist die Höhe, bis zu welcher sie ansteigen, nicht dieselbe (Fig. 46). Gießen wir zuerst Quecksilber ein, so wird sich dasselbe auf beiden Seiten in gleichem Niveau einstellen. Gießt man nun in die Röhre auf der linken Seite Wasser, so wird das Quecksilber durch den Druck, den die neu hinzugegossene Flüssigkeit ausübt, auf der andern Seite steigen, allein nicht zu derselben Höhe, bis zu welcher sich das Wasser erhebt: sondern, wenn man die Höhen von dem Punkte an bestimmt, wo beide Flüssigkeiten an einander grenzen, so werden sich diese Höhen umgekehrt wie die Dichtigkeiten verhalten. Wenn z. B. die Quecksilbersäule auf der rechten Seite 3^{mm} höher steht, als links, so wird die Wassersäule eine Höhe von $40{,}8^{mm}$ erreichen, da das Quecksilber 13,6 mal so schwer ist, als das Wasser.

§ 3. Gleichgewicht der Körper, welche in eine Flüssigkeit getaucht sind. Archimedisches Princip.

Wenn wir irgend einen Gegenstand, der leichter ist als Wasser, z. B. ein Stück Holz oder Kork, in diese Flüssigkeit eintauchen, so müssen wir auf denselben einen gewissen Druck ausüben, um ihn unter Wasser zu halten: lassen wir ihn aber frei, so steigt er senkrecht aufwärts und schwimmt auf der Oberfläche, indem ein Theil im Wasser eingetaucht bleibt, ein anderer aber sich über den Spiegel erhebt. Fragen wir nun nach der Ursache dieser Erscheinung, so lautet die Antwort wieder: die Schwerkraft. Denn, wie wir gesehen haben, bewirkt die Schwerkraft, daß die Flüssigkeiten auf alle Flächen, mit denen sie in Berührung kommen, und welche tiefer liegen, als der Flüssigkeitsspiegel, einen Druck ausüben. Ist nun ein Körper vollständig in Wasser getaucht, so heben sich die Druckkräfte, die von den Seiten her wirken, gegenseitig auf: die Druckkraft dagegen, welche gegen die untere Fläche wirkt, und deren Existenz der durch Fig. 39 erläuterte Versuch bewies, übersteigt die von oben her wirkende um eine Größe, die der Höhe des eingetauchten Körpers entspricht, sodaß schließlich ein Druck nach oben, also der Richtung der Schwerkraft entgegengesetzt, übrig bleibt. Die Stärke dieses Druckes

Digitized by Google

ist immer dem Gewichte der aus seiner Stelle verdrängten Wassermasse gleich und seine Richtung fällt immer in die senkrechte Linie, die durch den Punkt geht, den der Schwerpunkt der verdrängten Flüssigkeit einnehmen würde.

Da dieser Druck, den wir Auftrieb nennen wollen, bei Körpern, die leichter sind, als Wasser, größer ist, als ihr Gewicht, so müssen sich dieselben in einer der Schwerkraft entgegengesetzten Richtung bewegen: man hat somit eine sehr einfache Erklärung für die Erscheinung, daß Holz und Kork im Wasser aufsteigen, ebenso wie in gleicher Weise Eisen in Quecksilber. Aber auch bei Körpern, die schwerer sind, als die Flüssigkeit, in welche sie tauchen, verschwindet dieser Druck durchaus nicht, nur ist er dann nicht mehr im Stande, dieselben zu heben: er bewirkt nur, daß ihr Gewicht um seine Größe vermindert erscheint. Dieses Gesetz oder Princip wurde etwa 200 Jahre v. Chr. durch einen der größten Mathematiker und Physiker, Archimedes, aufgefunden und lautet, in Worte gefaßt, folgendermaßen:

Jeder in eine Flüssigkeit getauchte Körper verliert an seinem Gewichte so viel, als die von ihm verdrängte Flüssigkeit wiegt.

Die Richtigkeit dieses Princips läßt sich durch folgenden Versuch beweisen.

Man läßt sich einen hohlen, unten geschlossenen, Messingcylinder anfertigen und ebenso einen massiven, welcher den vorigen genau ausfüllt: beide sind mit Haken versehen und werden, der massive unter dem hohlen, auf der einen Seite einer Wage angehängt, worauf durch Gegengewichte auf der anderen Seite das Gleichgewicht der Wage hergestellt wird. Taucht man nun den massiven Messingcylinder in Wasser ein (Fig. 47), so wird dadurch das Gleichgewicht sofort gestört, der Cylinder hebt sich ein wenig aus dem Wasser heraus, während sich die Wagschale mit der Tara senkt. Hieraus schon ist ersichtlich, daß der Cylinder durch das Wasser aufwärts getrieben wird, oder auch, daß er an seinem Gewichte zu verlieren scheint. Um die Größe jenes Auftriebes oder, was dasselbe ist, dieses Gewichtsverlustes zu bestimmen, fülle man den oberen, hohlen Messingcylinder nach und nach mit Wasser, so wird sich diese Seite der Wage auch allmählich wieder mehr und mehr senken: und, ist der massive Cylinder vollständig in Wasser getaucht, so wird das Gleich-

Digitized by Google

gewicht wieder hergestellt, wenn zugleich auch der hohle Cylinder bis an den Rand mit Wasser gefüllt ist.

Welcher Schluß läßt sich nun aus dieser Beobachtung ziehen? um wie viel ist durch das Eintauchen das Gewicht des Messingcylinders geringer geworden? Die Antwort ist sehr einfach. Um das Gleichgewicht wieder herzustellen, mußte man den hohlen Cylinder mit Wasser füllen,

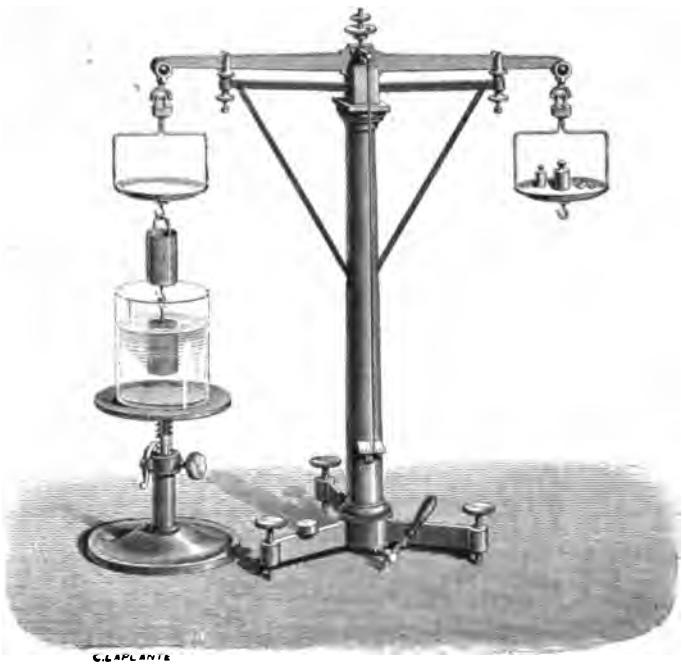


Fig. 47. Experimenteller Beweis des Archimedischen Princips.

mußte man das Gewicht des Wassers, das ihn erfüllt, neu hinzufügen: mithin hat der eingetauchte Cylinder genau so viel an Gewicht verloren, als das Wasser wiegt, das er aus seiner Stelle verdrängt hat; und damit ist das Archimedische Princip durch den Versuch bewiesen.

Es bietet immer ein gewisses Interesse zu sehen, wie manche Wahrheiten, wenn sie falsch gedeutet werden, zu mancherlei Irrthümern verleiten; denn durch die Erkenntniß der Fehler, die gemacht worden sind, lernt man den wahren Sinn besser verstehen. So hat auch das Archimedische Princip zu folgender Ueberlegung geführt, von deren Unrichtigkeit man sich aber sehr bald überzeugen kann. Stellt man auf eine Wagschale ein Glas Wasser und legt man daneben einen festen Körper,

Digitized by Google

vielleicht ein Stück Metall, so wird die andere Wagschale durch ein bestimmtes Gewicht zu belasten sein, um Gleichgewicht herzustellen. Legt man nun das Metallstück nicht neben das Glas, sondern in das Wasser selbst hinein, so verliert es ja an Gewicht, und so meinen manche, daß man nun von den Gegengewichten auf der anderen Wagschale etwas weniges hinwegnehmen müsse, damit das Gleichgewicht wieder hergestellt sei. In ganz ähnlicher Weise hört man bisweilen die Behauptung aussprechen, daß ein Bassin mit Wasser an Gewicht nicht zunehme, wenn in das Wasser Goldfische gesetzt werden; ja man sucht die Behauptung durch den Versuch zu bestätigen, der scheinbar auch gelingt, jedoch nur deshalb, weil man dabei Wagen anwendet, die viel zu roh gearbeitet sind, als daß sie für ein so geringes Gewicht, wie das der leichten Thiere noch einen Ausschlag geben. Gebraucht man genauere Wagen, so zeigt das Bassin ein größeres Gewicht, sobald die Fische eingetaucht sind, im ersten Falle aber ist es gleichgültig, ob das Metallstück neben dem Gefäße auf der Wagschale, oder im Wasser selbst liegt.

Fig. 48. Archimedisches Princip. Wirkung eines Körpers auf die Flüssigkeit, in welche er getaucht ist.

Wie ist dies aber zu erklären, da doch das Metallstück im Wasser von seinem Gewichte verloren hat? Sehr einfach: so viel, als das Metallstück an Gewicht verloren hat, ebensoviel hat das Wasser selbst gewonnen, wie man leicht durch folgenden Versuch bestätigen kann.

Stellt man auf die eine Wagschale ein Glas, das nicht vollständig mit Wasser gefüllt ist (Fig. 48), tarirt durch Gegengewichte, und taucht dann den massiven Messingcylinder ein, der an einem Stativ hängt, so ist sofort das Gleichgewicht gestört, die Schale mit dem Wasser sinkt herab, das Wasser hat

Digitized by Google

also an Gewicht zugenommen. Will man nun das Gleichgewicht wieder herstellen, so kann dies am einfachsten dadurch geschehen, daß man von dem Wasser im Glase einen Theil aushebt: sammelt man die ausgehobene Flüssigkeit in dem hohlen Cylinder, so wird man finden, daß die Wage wieder genau auf den Nullpunkt einspielt, sobald der Cylinder gefüllt ist. Wenn also, wie wir erst gesehen haben, der eingetauchte Körper scheinbar an seinem Gewichte soviel verliert, als das von ihm verdrängte Wasser wiegt, so lehrt uns der letzte Versuch, daß das Gewicht des Wassers im Glase um dieselbe Größe scheinbar zunimmt.

Das Archimedische Princip gehört mit zu den wichtigsten Gesetzen, die in der Natur herrschen: denn, nicht allein daß es uns über viele Erscheinungen aufklärt, die sich bei eingetauchten Körpern zeigen, so giebt es uns auch noch die Möglichkeit, verschiedene Aufgaben zu lösen, die für die Praxis von der größten Wichtigkeit sind. So kann man mit seiner Hülfe im Voraus bestimmen, welche Form man einem Schiffe geben muß, wie stark man dasselbe belasten darf, und wie man auf ihm die Last vertheilen muß, damit es sich in möglichst stabilem Gleichgewichte befinde, ohne daß dabei andere Erfordernisse, wie die Geschwindigkeit, leichte Lenkbarkeit, Festigkeit u. s. w. beeinträchtigt werden. Daß im Innern der Flüssigkeiten ein Auftrieb vorhanden ist, das macht sich uns in sehr vielen Fällen merklich: befinden wir uns selbst im Bade und heben wir unter Wasser einen Arm, so fühlen wir, wie viel geringer die Anstrengung ist, die unsere Muskeln machen müssen, als wenn wir dasselbe in der Luft ausführen; ebenso heben wir unter Wasser mit Leichtigkeit große Steine, die wir in der Luft kaum von der Stelle rücken können. Gehen wir allmählich in einen Fluß, der am Rande seicht ist und nach der Mitte zu immer tiefer wird, so fühlen wir, daß unsere Füße immer weniger gegen den Grund drücken, und endlich wird es uns schwer, sie überhaupt gegen den Boden zu stemmen: dann strebt unser Körper, dessen Gewicht vom Auftriebe fast ganz aufgehoben wird, nach der horizontalen Lage, weil er sich bei aufrechter Stellung im Wasser im labilen Gleichgewichte befindet.

Besitzt ein Körper ein größeres Gewicht, als eine Wassermasse von gleichem Volumen, so wird er sich nicht an der Oberfläche des Wassers halten können, sondern sinkt mit einer Kraft, die so viel beträgt, als der Ueberschuß seines Gewichtes über den Auftrieb: ist dagegen sein

Digitized by Google

Gewicht geringer, so kann er nicht am Grunde bleiben, sondern steigt mit dem Ueberschusse des Auftriebes über das Gewicht und schwimmt auf der Oberfläche. So schwimmen die meisten Holzarten, Kork, Wachs, Eis auf dem Wasser, während die Mehrzahl der Steine und Metalle zu Boden sinken. Auf der Oberfläche des viel dichteren Quecksilbers bleiben Kugeln aus Blei, Eisen, Kupfer und Silber schwebend, Gold dagegen und Platin würden auch in dieser Flüssigkeit untersinken.

Hätte man einen Körper, dessen Gewicht genau so groß wäre als das eines gleichen Volumen Wassers, und in dem zugleich die Masse ganz gleichmäßig vertheilt wäre, so würde derselbe im Wasser in jeder Lage im Gleichgewichte bleiben: denn in diesem Falle ist nicht nur das Gewicht dem Auftriebe gleich, sondern beide Kräfte greifen auch immer in demselben Punkte an, weil der Schwerpunkt des Körpers mit dem Schwerpunkte der verdrängten Wassermasse zusammenfällt.

Durch ein eigenthümliches Organ ist den Fischen die Möglichkeit gegeben, sich im Wasser nach Belieben heben und senken zu können. Dieselben besitzen nämlich in ihrem Körper eine Blase, die sogenannte Schwimmblase, welche bei den meisten mit der Speiseröhre in Verbindung steht, sodaß sie mit Luft gefüllt oder auch wieder zusammengedrückt werden kann. Je nachdem nun der Körper des Fisches durch Aufblähen der Schwimmblase an Volumen zunimmt, so wird das Gewicht des verdrängten Wassers mehr betragen, als sein eigenes Gewicht, und es wird mithin ein Aufsteigen erfolgen, während im entgegengesetzten Falle, beim Zusammendrücken der Blase, das Thier in die Tiefe hinabsinkt.

Anders gestalten sich die Verhältnisse, wenn wir selbst im Wasser schwimmen. Da unser Körper etwa um den zehnten Theil schwerer ist, als ein gleiches Volumen Wasser, so wird er, bei einem Gewichte von z. B. 60 Kgr., im Wasser nur etwa $54\frac{1}{2}$ Kgr. verlieren, also immer noch mit einem Gewichte von $5\frac{1}{2}$ Kgr. sinken, wenn wir ihn nicht durch geeignete Bewegungen unserer Gliedmaßen beständig schwebend erhalten. Dabei müssen wir aber nur immer eine Last von $5\frac{1}{2}$ Kgr. in die Höhe heben, während wir z. B. beim Ersteigen einer Treppe die vollen 60 Kgr. aufwärts bewegen müssen.

Wir können uns nicht versagen, hier einen interessanten Versuch zu erwähnen, den Delaunay in seiner Mechanik mittheilt, und der aus dem

Digitized by Google

archimedischen Principe leicht verständlich ist. Wirft man in ein Glas Champagner eine Weinbeere, so fällt dieselbe durch ihr Gewicht sofort zu Boden; bald aber sammelt sich an ihrer Oberfläche Kohlensäure, die sich aus dem Wein entwickelt, in Form von kleinen Blasen, wodurch sich ihr Volumen vergrößert, ohne daß sich ihr Gewicht wesentlich ändert. Da nun der Auftrieb größer geworden ist, indem eine größere Menge Flüssigkeit durch die Beere verdrängt wird, so wird dieselbe gehoben und schwimmt an der Oberfläche. Ertheilt man ihr nun einen kleinen Stoß, durch welchen sich die Blasen der Kohlensäure von ihr ablösen, so sieht man sie wieder auf den Grund hinabsinken, um bald darauf von Neuem aufzusteigen, sobald sich genug Kohlensäure an sie angehängt hat. Der Versuch gelingt so lange, als der Wein Kohlensäure entwickelt.

Schwimmt im Wasser ein Körper, der genau so viel wiegt, als das von ihm verdrängte Wasser, in dem aber die Masse nicht gleichmäßig vertheilt ist, der z. B. aus einem Stückchen Hollundermark und einem Bleiknopfe besteht, so wird der Schwerpunkt desselben nicht mit dem Schwerpunkte der verdrängten Wassermasse zusammenfallen. Soll nun Gleichgewicht stattfinden, so ist nothwendig, daß die beiden genannten Punkte in ein und dieselbe senkrechte Linie fallen, wie in der Stellung 1 und 2 der Fig. 49. Liegt hierbei der Schwerpunkt des Körpers höher, als der des Wassers, wie in der Stellung 2, so ist das Gleichgewicht ein labiles: denn, wenn er durch einen Stoß in die Lage 3 gebracht wird, so wird er sich aus seiner ursprünglichen Lage immer weiter entfernen, und nicht eher zu Ruhe kommen, als bis er die Stellung 1 angenommen hat.

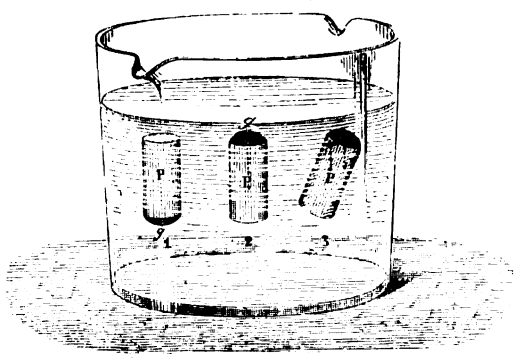


Fig. 49. Gleichgewicht eines Körpers, der in eine Flüssigkeit von gleicher Dichtigkeit getaucht ist.

Ist das Gewicht eines Körpers geringer, als das des Wassers, welches er verdrängen würde, wenn er ganz eintauchte, indem entweder seine Masse weniger dicht ist, oder weil sich in seinem Innern hohle Räume befinden, so wird derselbe an der Oberfläche schwimmen und nur so tief

Digitized by Google

eintauchen, daß das Gewicht des wirklich verdrängten Wassers seinem Gesammtgewichte gleich kommt. So wiegt ein Schiff mit seiner Belastung jeglicher Art zusammengenommen genau soviel, als das Wasser des Meeres, welches unterhalb der Wasserlinie von ihm aus seiner Stelle verdrängt wird. Soll das Gleichgewicht ein stabiles sein, so muß auch hier die vorige Bedingung erfüllt werden, daß der Schwerpunkt des schwimmenden Körpers tiefer liegt, als der des verdrängten Wassers, weshalb man die Schiffe immer in ihren untersten Räumen belastet, und in dem Falle, daß es an genügender Ladung fehlt, durch Aufnahme von Ballast den Schwerpunkt hinabdrückt. Doch selbst beim ruhigsten Meere sind die Schiffe niemals im absoluten Gleichgewichte, sondern führen mehr oder weniger große Schwankungen aus; es muß daher die Aufgabe sein, die Gestalt so zu bestimmen und die Ladung so zu vertheilen, daß selbst in den ungünstigsten Fällen der Auftrieb und das Gewicht das Fahrzeug wieder in die Gleichgewichtslage zurückführen.

§ 4. Bestimmung der Dichtigkeit der Körper.

Mit Hülfe des Archimedischen Principes ist es möglich, eine sehr wichtige Aufgabe zu lösen, nämlich die Dichtigkeit fester und flüssiger Körper zu bestimmen; und wir wollen uns jetzt mit den Methoden beschäftigen, durch welche man diese Größe ermittelt.

Wir wollen zunächst nochmals daran erinnern, daß wir unter der Dichtigkeit eines Körpers das Verhältniß seines Gewichtes zu dem einer Masse destillirten Wassers von gleichem Volumen verstehen, und beiläufig bemerken, daß man gewöhnlich die Temperatur des zu prüfenden Körpers zu 0^0 voraussetzt, während man für das Wasser die Normaltemperatur von 4^0 C. annimmt, weil dasselbe bei dieser Temperatur den größten Grad von Dichtigkeit besitzt. Will man nun die Dichtigkeit eines Körpers wissen, so muß man zuerst mit Hülfe einer Wage sein Gewicht bestimmen, und hierauf das Gewicht einer Wassermasse von gleichem Volumen ermitteln, was in einer Weise geschieht, über die wir uns jetzt näher aussprechen wollen. Hat man jene zwei Werthe gefunden, so ergiebt eine einfache Division des ersten durch den zweiten als Quotient die Dichtigkeit des Körpers.

Die einzige Schwierigkeit besteht demnach nur noch in der Bestimmung

Digitized by Google

des Gewichtes des verdrängten Wassers, und wir wollen an einigen Beispielen die Methode kennen lernen, die man zu diesem Behufe anwendet.

Das einfachste Verfahren, das zu diesem Ziele führt, besteht in directer Wägung mit Hülfe einer Wage, deren Schale mit Haken zum Anhängen der Körper, die der Prüfung unterzogen werden sollen, versehen ist (Fig. 50). Nehmen wir etwa ein Stück Eisen, dessen Gewicht z. B. 246,5 gr. beträgt, und hängen wir dasselbe mittelst eines sehr feinen Fadens an die eine Wagschale an, so wird man die andere Wagschale durch eine Tara belasten müssen, um das Gleichgewicht herzustellen. Senkt man nun das Eisenstück in Wasser ein, so wird sich der Wagbalken nach der Seite der Tara hin neigen, bis man durch Auflegen neuer Zusatzgewichte auf die Seite, wo das Eisen angehängt ist, das Gleichgewicht wieder hergestellt hat. Seien hierzu 31,65 gr. erforderlich, so ist durch diese Zahl nach dem Archimedischen Principe das Gewicht des verdrängten Wassers bestimmt, und man hat also nur 246,5 durch 31,65 zu dividiren, um die Dichtigkeit des Eisens zu bestimmen. Diese Division ergibt, daß das Eisen 7,788 mal so dicht ist, als Wasser.

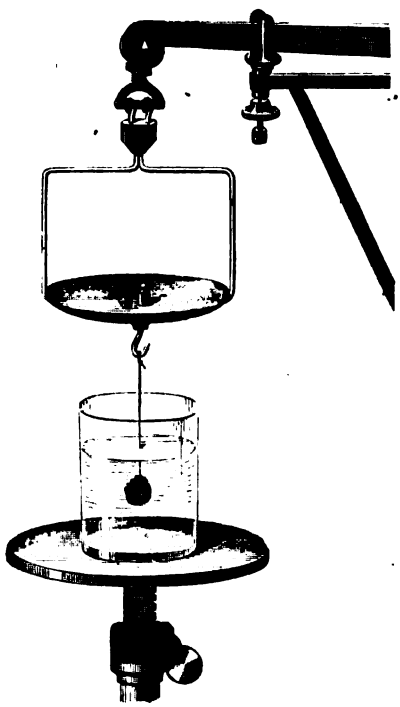


Fig. 50. Dichtigkeit fester Körper. Methode der Wägung.

Eine zweite Methode besteht in der Anwendung eines Instrumentes, das zwar von Charles erfunden ist, gewöhnlich aber nach einem anderen Physiker als das Nicholson'sche Aräometer bezeichnet wird (Fig. 51). Dasselbe besteht aus einem beiderseits geschlossenen, hohlen Messingcylinder, der unterhalb eine kleine Schale, oberhalb aber mittelst eines langen Stabes einen Teller trägt. Das Gewicht des Apparates ist so bemessen, daß der Cylinder im Wasser nicht vollständig einsinkt, und daß man auf den Teller eine bestimmte Menge Zusatzgewichte auflegen

Digitized by Google

muß, damit der Apparat bis zu einem bestimmten Punkte des Stabes, der durch einen Feilstrich markirt ist, einsinkt. Nehmen wir z. B. an, dieses Zusatzgewicht betrage 100 gr. Legen wir nun auf den Teller den zu prüfenden Körper, vielleicht ein Stück Schwefel, dessen Gewicht aber noch nicht 100 gr. betragen darf, und ist zum Einsinken bis zur Marke noch eine Tara von 35,8 gr. erforderlich, so wird man hieraus

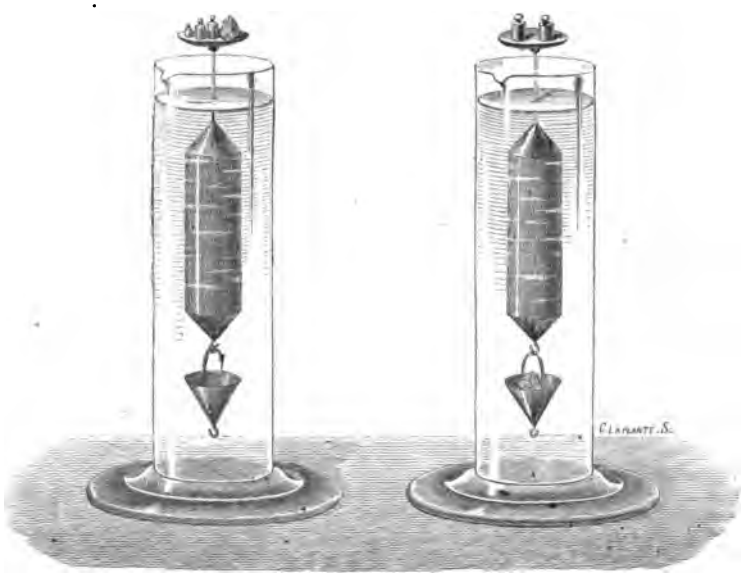


Fig. 51. Dichtigkeit fester Körper. Aräometer nach Charles oder Nicholson.

schließen, daß das Gewicht des Schwefels so viel beträgt, als zu den 100 gr. noch fehlt, also 64,2 gr. Man sieht, daß das Aräometer auch ganz einfach als Wage dienen kann. Nimmt man aber nun das Stück Schwefel vom Teller und legt es in die Schale unterhalb des Cylinders, so wird es im Wasser an Gewicht verlieren, und der Teller ist wieder mit neuen Zusatzgewichten zu belasten, die so viel betragen, als der Verlust im Wasser, oder als das Gewicht der verdrängten Wassermasse. Beträgt im vorliegenden Falle das letzte Zusatzgewicht 31 gr., so findet man die Dichtigkeit des Schwefels durch $64{,}2 : 31 = 2{,}07$.

Will man dasselbe Instrument für Körper anwenden, deren Dichtigkeit geringer ist, als die des Wassers, so hat man die Schale am unteren Ende nur umzukehren, damit der Körper, wenn er im Wasser aufsteigen will, auf ein Hinderniß trifft und nun gegen das Aräometer von Unten her einen Druck ausübt.

Digitized by Google

Bei einer dritten Methode, die Dichtigkeit fester Körper zu bestimmen, benutzt man eine Flasche mit gut eingeriebenem Glaspfropfen, der immer genau bis zu derselben Tiefe eingesenkt wird. Man füllt die Flasche mit Wasser, stellt sie auf die Wagschale, legt den Körper, dessen Dichtigkeit bestimmt werden soll, daneben, und tarirt (Fig. 52). Hierauf bringt man den Körper in die Flasche selbst, wobei so viel Wasser ausfließen muß, als sein Volumen beträgt, setzt den Pfropfen wieder ein, wischt die Flasche sorgfältig ab, und stellt sie wieder auf die Wagschale: so wird man nun von der Tara so viel hinwegnehmen müssen, als das Gewicht des ausgeflossenen Wassers beträgt. Aus diesem Gewichte und dem Gewichte des Körpers läßt sich nun in gleicher Weise, wie zuvor, die Dichtigkeit desselben bestimmen. Man sieht, daß bei dieser Methode das Archimedische Princip nicht zur Anwendung kommt, und deshalb kann sie zur Bestätigung dieses Principes dienen, wenn man die Bestimmung der Dichtigkeit zugleich nach dieser und den vorher besprochenen Methoden ausführt.

Fig. 52. Dichtigkeit fester Körper. Anwendung der Flaschen mit eingeriebenem Pfropfen.

Noch sind bei allen drei Arten, die Dichtigkeit fester Körper zu bestimmen, einige Vorsichtsmaßregeln wohl zu beachten. Zunächst hängen sich an jeden Körper beim Eintauchen eine Menge Luftblasen an, die sein Volumen vergrößern ohne sein Gewicht wesentlich zu ändern: es ist daher nothwendig, nach dem Eintauchen und vor der Wägung das Wasser eine Zeit lang kochen zu lassen, damit die Luft vollständig ausgetrieben werde. Ferner läßt sich die Bestimmung nicht für solche Körper ausführen, die das Wasser in sich einsaugen oder sich in ihm auflösen, wie Zucker und Salze: die Dichtigkeit dieser Körper muß man dann in Bezug auf andere Flüssigkeiten, z. B. Oel bestimmen, oder man muß sie mit einer sehr dünnen, schützenden Schicht von Firniß überziehen; doch ist im letzteren Falle bei genauen Versuchen diese Schicht mit zu berücksichtigen.

In ähnlicher Weise verfährt man bei der Bestimmung der Dichtigkeit der Flüssigkeiten. Auch hier besteht die erste Methode darin, daß man eine hohle, zum Theil mit Quecksilber gefüllte Glaskugel (Fig. 53)

Digitized by Google

erst in der Luft, dann in Wasser, und endlich in der zu untersuchenden Flüssigkeit wiegt: der Ueberschuß der ersten Zahl über die zweite giebt das Gewicht des verdrängten Wassers; ebenso findet man das Gewicht der verdrängten anderen Flüssigkeit als Differenz der ersten und dritten Zahl, und endlich ergiebt sich die Dichtigkeit derselben dadurch, daß man den letzten Unterschied durch den ersten dividirt.

Fig. 53. Dichtigkeit der Flüssigkeiten. Methode der Wägung.

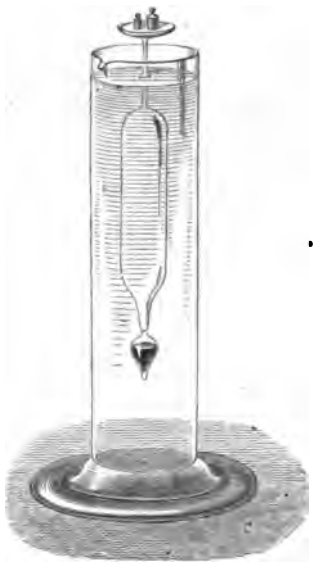


Fig. 54. Dichtigkeit der Flüssigkeiten. Aräometer nach Fahrenheit.

Auch das Nicholson'sche Aräometer läßt sich auf Flüssigkeiten anwenden, doch ist in diesem Falle das Aräometer nach Fahrenheit (Fig. 54) bequemer. Dasselbe unterscheidet sich von ersterem, abgesehen davon, daß es gewöhnlich aus Glas verfertigt ist, hauptsächlich dadurch, daß sich an Stelle der kleinen Schale eine fest angeschmolzene, mit Quecksilber gefüllte Kugel befindet, durch welche der Schwerpunkt in den unteren Theil verlegt wird. Man bestimmt nun zunächst das Gewicht des Instrumentes und addirt dazu die Gewichte, die auf den Teller aufgesetzt werden müssen, damit es im Wasser bis zu einer bestimmten Marke einsinkt, so kennt man das Gewicht des von ihm verdrängten Wassers. In gleicher Weise bestimmt man das Gewicht eines gleichen Volumen

Digitized by Google

der anderen Flüssigkeit, und endlich durch Division die Dichtigkeit derselben. Noch bequemer zu handhaben sind die sogenannten Scalenaräometer, bei denen man die Dichtigkeit leicht dadurch bestimmt, daß man die Tiefe, bis zu welcher sie in den verschiedenen Flüssigkeiten einsinken, auf einer Scala abliest.

Fig. 55. Dichtigkeit der Flüssigkeiten. Anwendung der Flasche.

Endlich gebraucht man auch für Flüssigkeiten Flaschen mit sehr engem Halse (Fig. 55), welche man sowohl leer, als auch wenn sie mit den verschiedenen Flüssigkeiten gefüllt sind, wiegt.

Am Schlusse dieses Kapitels wollen wir nun noch den Werth der Dichtigkeit für einige Körper mittheilen, bemerken aber, daß die Zahlen nur für die Temperatur von 0° gelten, wenn nicht ausdrücklich etwas anderes bemerkt ist: denn da sich, wie wir später ausführlicher besprechen werden, das Volumen der Körper mit der Temperatur ändert, nicht aber das Gewicht, so ist auch ihre Dichtigkeit veränderlich, und deshalb muß auch die Vergleichung bei gleicher Temperatur vorgenommen werden.

Dichtigkeit fester Körper.

Metalle.		Steine u. dergl.		Pflanzenstoffe.	
Platin, gewalzt	22,06	Diamant	3,53	Buxbaum	1,32
Gold, gegossen	19,26	Marmor	2,65—2,84	Ebenholz	1,19
Blei, gegossen	11,35	Granit	2,75	Eichenholz, Kern	1,17
Silber, gegossen	10,47	Quarz	2,65	Buchenholz	0,75
Kupfer, gewalzt	8,95	Sandstein	2,20—2,65	Ahorn	0,65
" , gegossen	8,85	Glas	2,44—2,50	Tanne	0,48
Eisen	7,79	Pflasterstein	2,20	Weide	0,49
Zinn	7,29	Porzellan	2,24	Pappel	0,39
Zink	7,19	Schwefel	2,09	Kork	0,24
Aluminium	2,67	Eis	0,93	Hollundermark	0,08

Dichtigkeit von Flüssigkeiten.

Quecksilber	13,596	Wasser bei 4°	1,000	Olivenöl	0,915
Brom	2,996	Wasser bei 0°	0,9998	Terpentinöl	0,869
Schwefelsäure, conc.	1,841	Milch	1,03	Steinöl	0,845
Salpetersäure, conc.	1,520	Bordeauxwein	0,994	Alkohol, absolut	0,792
Meerwasser	1,026	Burgunder	0,991	Schwefeläther	0,736

Digitized by Google

Sechstes Kapitel.

Wirkung der Schwerkraft auf luftförmige Körper.

§ 1. Die Luft und andere Gase sind schwer und elastisch.

Das feste Land, das wir bewohnen, ist gleichsam nur der Grund eines weiten Oceans, der, aus einer sehr beweglichen, dünnen Flüssigkeit gebildet, die ganze Erdkugel umgiebt, und dessen Tiefe mindestens hundert mal so groß ist, als die mittlere Tiefe der Meere. Die Flüssigkeit, aus der jener Ocean besteht und die wir atmosphärische Luft nennen, ist ein Gemenge aus mehreren gasförmigen Substanzen, unter denen Sauerstoff und Stickstoff die wichtigsten sind und den überwiegend größten Raum für sich in Anspruch nehmen. Außerdem finden sich fast immer in der Luft noch Kohlensäure, Wasserdampf, Ammoniak, und andere Gase; allein die Menge dieser Stoffe ist gewöhnlich ziemlich gering und auch sehr veränderlich, während das Verhältniß jener Hauptbestandtheile ein sehr constantes ist: denn überall findet man in 100 Raumtheilen Luft etwa 21 Raumtheile Sauerstoff gemengt mit 79 Raumtheilen Stickstoff.

Die Luft ist bekanntlich der unentbehrlichste Stoff für alle lebenden Wesen, ohne welchen der zur Erhaltung des Lebens an erster Stelle nothwendige Proceß des Athmens nicht stattfinden könnte, und selbst die Thiere, die in der Regel unter Wasser leben, können ohne diesen Stoff durchaus nicht existiren. Doch auch die Pflanzen schöpfen aus der Luft einen großen Theil ihrer Nahrung, indem sie unter dem Einflusse des Lichtes die Kohlensäure zersetzen, den Kohlenstoff in ihrem Körper zurückbehalten und den Sauerstoff ausathmen, welcher wiederum den Thieren zu ihrer Erhaltung dient.

Da die Luft in sehr hohem Grade durchsichtig ist, so kann man ihre Anwesenheit durch den Gesichtssinn nicht wahrnehmen, ausgenommen, wenn sie in einer sehr dicken Schicht vorhanden ist: sehen wir z. B. nach sehr entfernten Gegenständen, nach Bergen, welche unsern Horizont begrenzen, so scheinen uns dieselben wie mit einem blauen Hauche übergossen; und diese blaue Färbung gewinnt noch bedeutend an Intensität, wenn wir durch das Luftmeer hindurch in den leeren Weltenraum hinaus-

Digitized by Google

schauen. Die Luft ist es, welche dem Himmelsgewölbe sein herrliches Blau verleiht; ohne sie würden wir vom leeren Raume gar kein Licht erhalten; derselbe würde uns farblos, also absolut schwarz erscheinen, und selbst bei Tage würden sich von diesem dunklen Untergrunde die Sterne als glänzende Punkte abheben. Ist das Licht des Tages erloschen, dann wird auch die Luft nur durch den schwachen Schimmer des Mondes und der Sterne erhellt, und dann erscheint sie uns in dunkelblauer Färbung; und dasselbe dunkle Blau sehen wir auch am Tage über uns, wenn wir uns auf sehr hohe Berge begeben, wo sich über uns nur noch eine geringere Menge Luft befindet, die von dem Sonnenlichte die blauen Strahlen uns zurückwirft.

Doch leichter, als für den Gesichtssinn, macht sich die Anwesenheit der Luft durch Erscheinungen bemerklich, welche auf die Werkzeuge des Gehörs und auf das Gefühl wirken. Schon wenn wir bei vollständig ruhiger Luft unsern Körper in Bewegung versetzen, so fühlen wir den Widerstand, den sie dem Vordringen entgegenstellt, und ebenso macht sie sich beim Athmen durch ihr Ein- und Ausströmen an unseren Lippen und den anderen Theilen des Mundes bemerklich; endlich fühlen wir auch stets ihre Anwesenheit durch die Bewegung, in der sie sich fast immer befindet, mag dieselbe nun im feinen Luftzug am offenen Fenster bestehen, oder in einer leichten Brise, die kaum die Blätter am Baume rührt, oder mag sie sich bis zum heftigsten Gewittersturm, bis zum stärksten Orkan steigern. Schließlich übertragen sich die Schwingungen eines tönenden Körpers auf die Luft, in der sie sich bis in unser Ohr fortpflanzen, um dort die Tonempfindung hervorzurufen; ja es kann sogar unter günstigen Verhältnissen eine Luftsäule für sich allein in schwingende Bewegung versetzt werden und so einen Klang hervorbringen, wie wir im zweiten Buche ausführlicher zeigen werden.

Daß die Luft ebenso, wie die anderen Gase, ein wirklicher physikalischer Körper ist, das sieht man endlich auch daraus, daß sie ein Gewicht besitzt. Wir werden bald ein sehr wichtiges Instrument, die Luftpumpe, kennen lernen, durch welches es möglich ist, aus einem Hohlraume die Luft wenigstens zum größten Theile zu entfernen, und also einen nahezu luftleeren Raum herzustellen: jetzt wollen wir zeigen, wie man mit Hülfe desselben das Gewicht der Luft- und anderer Gase bestimmen kann. Entfernt man vermittelst dieses Apparates die Luft aus einem Ballon,

Digitized by Google

der sich durch einen Hahn abschließen läßt (Fig. 56), und hängt man den Ballon hierauf an eine Wagschale, so wird man leicht sein Gewicht bestimmen können. Oeffnet man nun, nachdem das Gleichgewicht der Wage hergestellt ist, den Hahn, sodaß die Luft wieder einströmt, so wird sich der Wagbalken sofort nach der Seite des Ballons neigen: ein Beweis, daß derselbe an Gewicht zugenommen hat, was sich nur dadurch erklären läßt, daß die eingeströmte Luft selbst ein bestimmtes Gewicht besitzt. Durch diesen Versuch, der zuerst von dem Erfinder der Luftpumpe, Otto von Guericke, angestellt wurde, hat man gefunden, daß ein Liter atmosphärische Luft ein Gewicht von 1,293 gr. besitzt, daß also ihre Dichtigkeit nur den 773. Theil der Dichtigkeit des Wassers beträgt. Läßt man andere Gase in den Ballon einströmen, so kann man das Gewicht derselben in ganz gleicher Weise bestimmen.

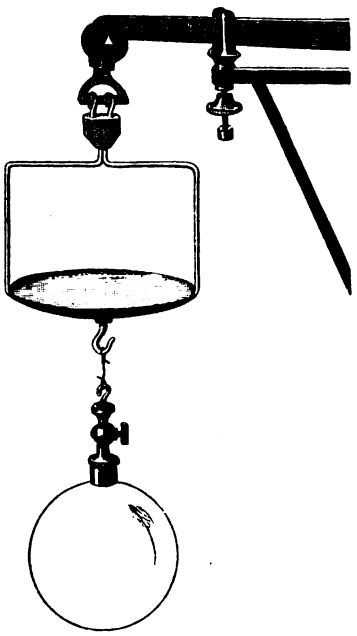


Fig. 56. Versuch, durch welchen das Gewicht der Luft nachgewiesen wird.

Nachdem wir somit gezeigt haben, daß die Luft und alle ähnlichen Stoffe ebenso, wie feste und flüssige Körper, der Schwerkraft unterworfen sind, wollen wir nun noch einige Eigenschaften derselben besprechen, durch welche sie Aehnlichkeit mit den Flüssigkeiten zeigen, oder auch sich von ihnen unterscheiden. Die Eigenschaft, durch welche sie den Flüssigkeiten gleichen, ist die große Beweglichkeit ihrer Theilchen, welche es ihnen möglich macht, dem geringsten Stoße zu weichen und anderen Körpern den Durchgang zu gestatten, ohne ihnen einen bedeutenden Widerstand entgegenzusetzen, es müßte denn die Bewegung derselben eine sehr rasche sein, oder ihre Oberfläche eine sehr große Ausdehnung besitzen, sodaß eine große Luftmenge gleichzeitig aus ihrer Stelle weichen muß. Durch diese Eigenschaft wird auch das leichte Strömen der Luftarten ermöglicht, sodaß man sie geradezu als *Flüssigkeiten* ansehen darf: und daher ist es auch strenger richtig, wenn die Physiker das Wasser einen *tropfbar flüssigen*, die Luft aber einen *elastisch flüssigen* Körper

Digitized by Google

nennen. Der Kürze wegen aber ziehen wir es vor, wie schon bisher, nur die erste Art von Körpern als Flüssigkeiten, die andere Art aber als Gase oder luftförmige Körper zu bezeichnen.

Was die Gase von den Flüssigkeiten wesentlich unterscheidet, das ist ihre leichte Zusammendrückbarkeit und Ausdehnsamkeit, mit einem Worte ihre große Elasticität. Legt man eine Schweinsblase, deren Oeffnung fest zugebunden ist und die nur wenig Luft enthält, unter eine Glocke, aus der man mit Hülfe der Luftpumpe die Luft entfernt, so wird sich die Luft in der Blase in demselben Grade, wie der Druck der Luft von Außen abnimmt, immer mehr ausdehnen und die Blase immer mehr aufblähen, ja sie sogar schließlich zersprengen (Fig. 57). Treibt man den Versuch nicht bis zum Sprengen der Blase, sondern läßt man zeitiger wieder Luft in die Glocke strömen, so wird durch den Druck der einströmenden Luft die Blase wieder auf ihr voriges Volumen zusammengepreßt. In ähnlicher Weise erhalten verschrumpfte Aepfel unter der Luftpumpe ihr frisches Aussehen wieder und schales Bier fängt an zu schäumen, indem sich in beiden Fällen die eingeschlossene Luft ausdehnt, sobald der äußere Druck nachläßt.

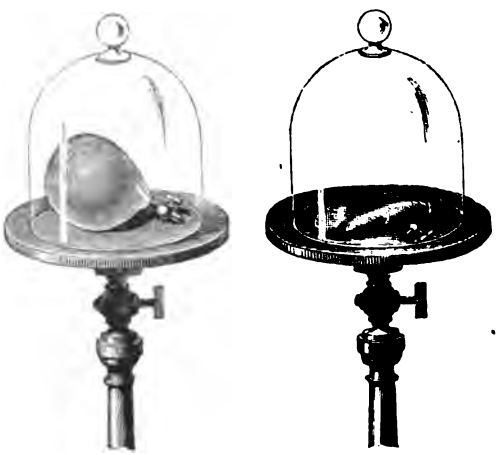


Fig. 57. Elasticität der Gase.

Auch mit dem pneumatischen Feuerzeuge (Fig. 58) läßt sich die Elasticität der Luft nachweisen. Diese Vorrichtung besteht aus einer sehr genau gebohrten, unten geschlossenen Glasröhre, in welcher sich ein gut anschließender Kolben mit der Hand herabdrücken läßt. Uebt man auf die Kolbenstange einen Druck aus, so preßt man die Luft in der Röhre auf einen kleineren Raum zusammen, und es ist leicht, ihr Volumen auf die Hälfte, auf den dritten, vierten Theil u. s. w. zu vermindern. Allein, je geringer das Volumen wird, einen desto stärkeren Druck muß man anwenden, um den Kolben noch weiter einzutreiben:

Digitized by Google

sobald man aber die Hand entfernt, so dehnt sich die zusammengedrückte Luft wieder aus und treibt den Kolben in die Höhe: sie wirkt also ähnlich, wie eine Springfeder, und deshalb sagen wir, sie ist elastisch. Wird der Kolben schnell herabdrückt, so erhitzt sich die Luft ziemlich stark, sodaß ein Stück Feuerschwamm, das am Kolben befestigt ist, zu glühen beginnt: daher der Name pneumatisches Feuerzeug.

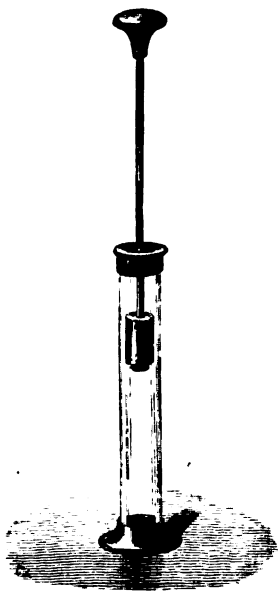


Fig. 58. Pneumatisches Feuerzeug.

Dieselbe Eigenschaft der Luft läßt sich mit einer noch einfacheren Vorrichtung nachweisen, mit einem Spielzeuge, das sich die Kinder wohl durch ganz Deutschland selbst verfertigen. Nimmt man eine Röhre aus Hollunderholz, die man beiderseits durch Pfropfen aus Kartoffeln schließt, so kann man mit einem Stabe den einen Pfropfen hineintreiben und dadurch die Luft zusammenpressen, bis dieselbe den anderen Pfropfen herausschleudert und sich mit einem kleinen Knalle wieder ausdehnt.

Die luftförmigen Körper lassen sich also sehr leicht auf einen viel kleineren Raum zusammendrücken, sie dehnen sich aber auch sogleich selbst wieder so weit aus, als ihnen Raum gegeben wird: ihre Theilchen stoßen sich also gegenseitig ab und suchen sich so weit von einander zu entfernen, als es die Druckkräfte, die von Außen auf sie wirken, zulassen. Hierin unterscheiden sie sich also wesentlich von den tropfbaren Flüssigkeiten, bei denen eine solche zurückstoßende Kraft oder, um den physikalischen Namen zu gebrauchen, Expansivkraft nicht vorhanden ist, die sich aber andererseits auch selbst durch starken Druck fast gar nicht zusammenpressen lassen, sodaß man sagen kann, daß das Volumen der letzteren Körper constant ist, während das der Gase jede beliebige Größe annehmen kann, solange sich der Aggregatzustand nicht ändert.

Ein weiterer Unterschied besteht in der weit geringeren Dichtigkeit der Dämpfe und Gase gegenüber den flüssigen Körpern, denn während das Gewicht eines Liters der letzteren zwischen den Grenzen 715 gr. (Aether) und 13596 gr. (Quecksilber) eingeschlossen ist, ist der größte

Digitized by Google

Werth für die luftförmigen Körper 11 gr. (Zinnchlorid), der niedrigste aber sinkt für das Wasserstoffgas bis auf 0,09 gr. herab.

Endlich zeigen beide Aggregatzustände darin wieder eine Uebereinstimmung, daß sich der Druck durch ihre ganze Masse gleichmäßig fortpflanzt, wie es für die Flüssigkeiten durch Fig. 35 anschaulich gemacht wurde; allein auch diese Eigenschaft ist eine Folge der beiden gemeinsamen leichten Verschiebbarkeit der Theilchen, welche wir oben erwähnten. Kehren wir jetzt zum Gewichte der Luft und dem dadurch bewirkten Drucke zurück.

§ 2. Der Luftdruck.

Schon in den frühesten Zeiten kannte man die Pumpen und wendete sie an, um das Wasser der unteren Erdschichten an die Oberfläche zu befördern: man wußte, daß, wenn eine Röhre mit ihrem unteren Ende in Wasser getaucht und in ihrem Innern ein Kolben aufwärts bewegt wurde, das Wasser den Bewegungen des Kolbens folgte und die Röhre erfüllte. Als man sich aber über diese Erscheinung Rechenschaft geben wollte, da fand man keine andere Erklärung, als daß die Natur einen Abscheu vor dem leeren Raume besäße und immer, wo sich ein solcher bilden wolle, denselben auszufüllen suche. Da geschah es im Jahre 1640, daß in Florenz ein neuer, ziemlich tiefer Brunnen angelegt werden sollte. Wohl hatten die Pumpenmacher die Röhren, Kolben und Ventile nach allen Regeln ihrer Kunst angefertigt, und doch gelang es ihnen nicht, das Wasser an die Oberfläche zu bringen: dasselbe stieg bis zur Höhe von ungefähr 32 Fuß, es aber weiter zu heben war unmöglich. Wie sollte man sich nun diese auffällige Erscheinung erklären? reichte der Abscheu vor dem leeren Raume nur bis zur Höhe von 32 Fuß? Vergebens wandte man sich an die Gelehrten der Florentiner Academie: Niemand wußte Auskunft zu ertheilen; ja selbst der durch sein Wissen allenthalben berühmte, damals schon sechsundsiebenzigjährige Galilei mußte zunächst eine ausweichende Antwort geben. Allein der Gegenstand beschäftigte den blinden Greis, der sich noch bis ins höchste Alter um die Lösung mechanischer Probleme bemühte, und bald verfiel der scharfsinnige Naturforscher auf die Vermuthung, daß wohl auch die Luft der Schwerkraft unterworfen sei und vermöge ihres Gewichtes das

Digitized by Google

Waſſer in die Brunnenröhre hinauftreibe. Um nun nachzuweiſen, daß auch die Luft Gewicht beſitzt, ſuchte er in einer Flaſche dadurch einen luftleeren Raum herzuſtellen, daß er etwas Waſſer in ihr kochte und ſie dann feſt verkorkte. Auf dieſe Weiſe zeigte er, daß die Flaſche etwas ſchwerer wurde, wenn nach Entfernung des Korkes wieder Luft in ſie eindrang, daß alſo die Luft Gewicht beſitzt. Die weiteren Unterſuchungen mußte er aber ſeinem Schüler Torricelli überlaſſen, dem es auch ein

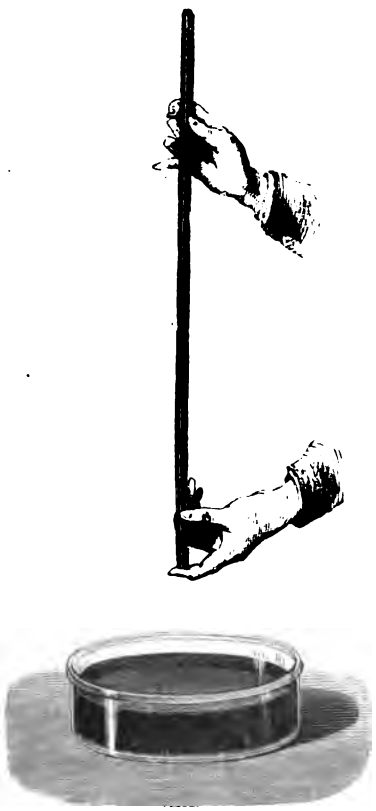


Fig. 59. Torricelli's Verſuch.

Fig. 60. Torricelli's Verſuch; Wirkung des Luftdrucks.

Jahr nach Galilei's Tode gelang, die Stärke des Luftdrucks durch folgenden Verſuch zu beſtimmen. Indem er von der Ueberlegung ausging, daß der Druck der Luft das mehr als dreizehnmal ſo ſchwere Queckſilber nur bis zu einer entſprechend geringeren Höhe hinauftreiben kann, als das Waſſer, füllte er eine, auf der einen Seite geſchloſſene, etwa 30 Zoll lange Glasröhre mit dieſem flüſſigen Metalle (Fig. 59 und 60).

Digitized by Google

Hierauf verschloß er mit dem Finger das offene Ende der Röhre, kehrte dieselbe um, tauchte das untere Ende unter Quecksilber, entfernte nunmehr seinen Finger und hielt nur die Röhre in aufrechter Stellung. Sogleich senkte sich nun das Niveau des Quecksilbers und blieb nach einigen Schwankungen ungefähr in der Höhe von 28 Zoll = 76 cm. über dem äußeren Quecksilberspiegel in Ruhe. Damit war nun Galilei's Hypothese, daß die Luft einen Druck von bestimmter Größe ausübe, vollständig bewiesen, denn Torricelli hatte gezeigt, daß, während Wasser auf die Höhe von 32 Fuß hinaufgedrückt wurde, sich das dreizehn und ein halb mal so dichte Quecksilber nur bis zu einer Höhe von 28 Zoll erhob, welche man erhält, wenn man 32 Fuß durch $13\frac{1}{2}$ dividirt.

So hat Torricelli im Jahre 1643 das Instrument in seiner einfachsten Form erfunden, das noch immer zur Bestimmung des Luftdruckes dient, das Barometer, und schon nach drei Jahren wendete Pascal dasselbe zu einem Zwecke an, für den es noch jetzt von der größten Wichtigkeit ist, nämlich zur Bestimmung der Höhen. Wenn der Druck der Luft, so meinte er, wirklich die Ursache ist, daß das Quecksilber in der Barometerröhre aufsteigt, so muß die Quecksilbersäule niedriger werden, wenn wir uns auf einen höheren Standpunkt begeben, weil dann nur noch eine Luftschicht von geringerer Dicke auf uns lastet. Daher stellte er mit seinem Schwager Perier gleichzeitige Barometerbeobachtungen am Fuße und auf dem Gipfel des Puy de Dôme an, eines Berges der Auvergne, der sich ziemlich steil über der benachbarten Landschaft bis zu einer Höhe von 4700 Fuß erhebt, und bestätigte die Folgerungen der Theorie und damit die Lehre Galilei's und Torricelli's*).

Aus der Gleichmäßigkeit, mit der sich der Druck in den Flüssigkeiten fortpflanzt, folgt sehr leicht, daß die Höhe der Quecksilbersäule in Torricelli's Versuche von der Weite der Röhre vollständig unabhängig ist, die-

*) „Ich habe mir einen Versuch ausgedacht, schrieb Pascal an Perier, durch welchen bei sorgfältiger Ausführung alle Zweifel gehoben werden können. Mißt man an demselben Tage mehreremals die Quecksilberhöhe am Fuße und auf dem Gipfel des Puy, der dicht bei unserer Stadt Clairmont liegt, indem man immer dasselbe Quecksilber benutzt, und findet man, wie ich erwarte, daß die Quecksilbersäule auf dem Gipfel niedriger ist, als unten, so ist dies ein Beweis, daß die Schwere oder der Druck der Luft die Ursache für das Aufsteigen der Flüssigkeit in der Röhre ist: denn am Fuße des Berges lastet sicherlich eine größere Luftmenge auf dem Flüssigkeitsspiegel, als in der Höhe, während sich kein Grund auffinden läßt, weshalb die Natur an einem Orte einen größeren Abscheu vor dem leeren Raume haben sollte, als an dem anderen."

Digitized by Google

selbe müßte denn sehr gering sein: ein Fall, den wir weiter unten ausführlicher besprechen werden. Denn wie durch Fig. 42, Seite 75, anschaulich gemacht wurde, lastet das über das äußere Niveau erhobene Quecksilber gleichmäßig auf der ganzen, im Gefäße enthaltenen Flüssigkeit und übt an der freien Oberfläche einen Druck aus, der bei jedem Flächenelemente, das dem Querschnitte der Röhre gleich ist, dem Gewichte des gehobenen Quecksilbers gleich kommt, und der nun vollständig durch den Druck der äußeren Luft aufgehoben wird. Die Atmosphäre lastet also auf jedem Punkte der Oberfläche des freien Quecksilberspiegels, und also auch allgemein auf jedem Punkte der Erdoberfläche und aller Körper mit derselben Stärke, als wenn alles mit einer Quecksilberschicht von ungefähr 76 cm. Dicke bedeckt wäre.

Ehe wir nun aus dieser Thatsache die Folgerungen ziehen, wollen wir über den Fall, daß man eine zu enge Röhre genommen hat, einige Worte sagen. Taucht man eine enge Glasröhre, ein sogenanntes Haar- oder Capillarröhrchen, in Wasser oder eine andere Flüssigkeit, durch welche das Glas benetzt wird, so sieht man, daß sich in ihrem Innern die Flüssigkeit höher stellt, als außerhalb; senkt man sie dagegen in Quecksilber, so sinkt dasselbe in ihr herab. Beide Erscheinungen, die man als Capillarattraction und Capillardepression bezeichnet, lassen sich aus der Anziehung erklären, welche die Flüssigkeitstheilchen einerseits unter sich, andererseits auf die Wandfläche ausüben, und zeigen sich in um so höheren Grade, je enger die Röhren sind. In weiten Röhren sieht man wohl die Flüssigkeit am Rande im ersten Falle etwas ansteigen, im andern sich etwas senken, aber in der Mitte steht sie dann in demselben Niveau, als außerhalb der Röhre. Wählt man daher das Barometerrohr zu eng, so wird sich die Capillardepression geltend machen und das Quecksilber wird nicht ganz zu derselben Höhe ansteigen, als in einem weiten Rohre.

Doch kehren wir zu dem Drucke der Luft zurück, dessen Stärke uns durch das Barometer angezeigt wird, so ist zu bemerken, daß derselbe sich durch die Luftmasse nach allen Seiten hin fortpflanzt und in alle Räume eindringt, die mit der atmosphärischen Luft in Verbindung stehen. Wenn daher unsere Stuben nicht hermetisch abgeschlossen sind, sondern irgend welche Verbindung mit dem freien Raume haben, und sei es auch nur durch das Schlüsselloch oder das Ofenrohr, so wird in

Digitized by Google

ihnen die Luft ebenso stark drücken, als außerhalb, und die Ablesung des Barometers wird in ihnen dasselbe Resultat ergeben, als wenn sich dieses Instrument im Freien befindet.

Berechnet man den Druck der Luft auf die Fläche eines Quadratmeters, so hat man das Gewicht einer Quecksilbersäule von 1 qm Grundfläche und 76 cm. Höhe zu bestimmen: diese Säule aber hat einen Inhalt von 760 Liter und also, da das Liter Quecksilber 13,596 Kgr. wiegt, ergiebt sich die enorme Last von 10333 Kgr. Wie ist es aber nun möglich, daß unter dieser ungeheuern Last nicht z. B. die Tische zusammenbrechen? Sehr einfach dadurch, daß derselbe Druck, der von oben auf der Tischplatte lastet, in gleicher Stärke auch von unten her auf sie drückt und so gleichmäßig vertheilt ist, daß auf jeden Quadratcentimeter doch nur ein Druck von etwas mehr als 1 Kgr. kommt, welcher auf die Form des festen Holzes noch durchaus keinen Eindruck machen wird. Auch unser eigner Körper, dessen Oberfläche im Mittel ungefähr $1^1/_2$ Quadratmeter beträgt, hat demnach einen Druck von etwa 15500 Kgr. zu ertragen; doch auch dieser Druck vertheilt sich gleichmäßig auf alle Seiten und hebt sich in seinen Wirkungen auf, sodaß nur noch die Frage entstehen kann, warum unser Körper durch diese Last nicht in sich zusammengepreßt wird. Doch auch hier ist zu bedenken, daß alle inneren Hohlräume entweder mit Luft oder mit Flüssigkeiten erfüllt sind, die ebenfalls von Innen heraus drücken und die Wirkung des äußeren Druckes aufheben. Daß ein solcher Druck von Innen wirklich stattfindet, sieht man aus der Wirkung der Schröpfköpfe: werden diese kleinen Gefäße aus Glas oder Metall auf die Haut gesetzt, nachdem die Luft in ihnen verdünnt wurde, so schwillt die Haut unter ihnen an, und endlich platzen die kleinen Blutgefäße und das Blut strömt aus, weil es nicht mehr durch den Luftdruck zurückgehalten wird.

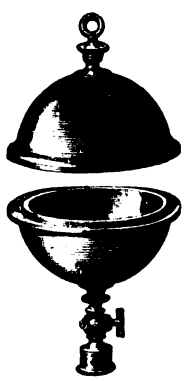


Fig. 61. Magdeburger Halbkugeln.

Die Wirkung des Luftdrucks läßt sich durch verschiedene Experimente zeigen, und wir wollen als einen der ältesten den Versuch mit den Magdeburger Halbkugeln erwähnen, den zuerst der berühmte Bürgermeister von Magdeburg, der Erfinder der Luftpumpe, Otto von Guericke im Jahre 1654 zu Regensburg vor Kaiser und Reich anstellte. Der genannte Versuch.

Digitized by Google

besteht darin, daß man zwei Halbkugeln aus Kupfer, die genau auf einander passen und mit einem Falze versehen sind um nicht seitwärts von einander abgleiten zu können, gegen einander drückt, und aus dem Hohlraume die Luft durch die Luftpumpe entfernt. Wird nun der Hahn, durch welchen die Luft herausgeleitet wurde, geschlossen, so ist schon bei einer kleinen Kugel ziemliche Kraft erforderlich, um ihre Hälften von einander zu trennen. Guericke benutzte Kugeln, deren Durchmesser 65 cm. betrug, und ließ, nachdem die Luft ausgepumpt war, auf jeder Seite vier starke Pferde anspannen, welche nicht im Stande waren die Kugeln zu trennen. Will man den Druck berechnen, den man beim Trennen der Kugeln überwinden muß, so darf man nicht die ganze Oberfläche der Kugel in Rechnung ziehen, sondern nur den Querschnitt, in welchem die Trennung erfolgen würde. Beträgt nun der Durchmesser 65 cm., so ist die Fläche des Querschnittes gleich 3318 qcm und mithin der auf ihr lastende Luftdruck 3429 Kgr., dies also das Gewicht, welches für die vier Pferde auf jeder Seite bei Guericke's Versuche gerechnet werden mußte. Ist der Halbmesser nur 1 dm., so beträgt dieses Gewicht doch noch 324 Kgr.

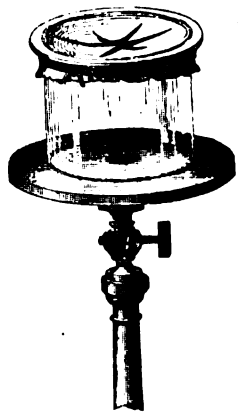


Fig. 62. Zersprengen einer Blase.

Ein anderer Versuch besteht darin, daß man durch den Druck der Luft eine Blase sprengt: man stellt auf den Teller der Luftpumpe ein cylindrisches Glasgefäß, das oben durch eine gespannte

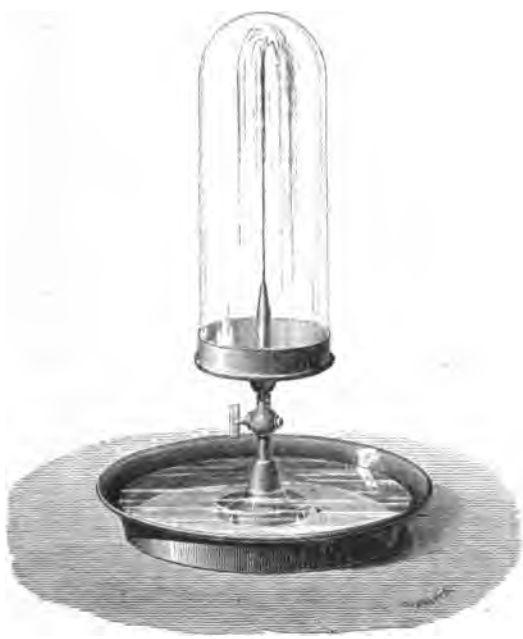


Fig. 63. Springbrunnen im luftleeren Raume.

Digitized by Google

Blase geschlossen ist (Fig. 62), welche das Eindringen der Luft verhindert. Verdünnt man nun die Luft im Innern, so sieht man, daß sich die Blase nach unten einbiegt, und endlich wird sie durch den Druck der atmosphärischen Luft gesprengt und diese letztere dringt mit einem lauten Knalle, der fast so stark ist, wie ein Pistolenschuß, in das Innere. Legt man auf ein ähnliches, aber engeres Gefäß, dessen oberer Rand geschärft ist, einen Apfel, so wird derselbe durch den Luftdruck hineingepreßt und dabei durch den Rand durchschnitten.

Noch wollen wir folgenden Versuch erwähnen, der den Druck auf eine Wasseroberfläche anschaulich macht. Man pumpt die Luft aus einer Glasglocke, die fest auf einen Teller aufgekittet ist, mittels einer durch einen Hahn verschließbaren Röhre, die im Innern der Glocke in eine Spitze endigt (Fig. 63). Hierauf schließt man den Hahn und bringt das untere Ende der Röhre unter Wasser. Oeffnet man nun den Hahn wieder, so wird das Wasser durch den Luftdruck mit Gewalt hineingepreßt und springt in Form eines Strahles gegen die Decke der Glocke.

§ 3. Das Barometer.

Bisher sind wir von der Annahme ausgegangen, daß der Luftdruck eine unveränderliche Größe sei und etwa dem Drucke einer Wassersäule von $10\frac{1}{3}^{m.}$ oder einer Queckſilbersäule von $76^{cm.}$ Höhe gleichkomme. Allein die Erfahrung hat gelehrt, daß auch dieser Druck nicht nur für verschiedene Orte andere Werthe besitzt, sondern daß er auch an einem und demselben Orte veränderlich ist. In welchem Zusammenhange diese Aenderungen mit anderen Erscheinungen im Luftkreise stehen, werden wir im letzten Buche untersuchen: jetzt aber wenden wir uns zu einer eingehenderen Besprechung des Instrumentes, das zur Ermittelung dieser Schwankungen dient, und das kein anderes ist, als das von Torricelli erfundene Barometer. Wir wollen nun sehen, welche Formen man diesem Instrumente gegeben hat, um es für verschiedene Verhältnisse brauchbar zu machen, und welche Vorsichtsmaßregeln man anwenden muß, damit seine Angaben möglichst genau werden.

Die einfachste Form bleibt immer die ursprüngliche, wie beim Torricelli'schen Versuche: man wählt dazu nur sehr weite Glasröhren, deren Durchmesser etwa 2 bis $3^{cm.}$ beträgt, und die möglichst gerade und von

Digitized by Google

gleicher Stärke ſind; Röhre und Gefäß aber werden an einem Stativ befeſtigt und möglichſt ruhig in ihrer Lage gelaſſen. Das Queckſilber, das man anwendet, muß ſehr rein ſein: man entfernt daher die gewöhnlich in ihm enthaltenen andern Metalle, wie auch das Queckſilberoxyd mit Hülfe von Salpeterſäure. Auch dürfen ſich im Queckſilber keine

Fig. 64. Normalbarometer.

Fig. 65. Gefäßbarometer.

Fig. 66. Birnbarometer.

Luftblaſen fangen, noch darf an der Glasröhre Feuchtigkeit hängen bleiben; denn wenn die Luftblaſen und der Waſſerdampf vermöge ihrer Leichtigkeit an das obere Ende der Queckſilberſäule aufſteigen, ſo üben ſie auf dieſelbe als elaſtiſche Flüſſigkeiten einen Druck aus, ſodaß die beobachtete Queckſilberſäule nicht als das richtige Maß für den Luftdruck gelten

Digitized by Google

kann. Daher muß man die Röhre, ehe man sie füllt, sorgfältig reinigen und gut austrocknen lassen; hat man sie mit Quecksilber gefüllt, so läßt man diese Flüssigkeit darin sieden, bis alle Luftblasen, die sie enthielt, vollkommen ausgetrieben sind, was sich dadurch bemerklich macht, daß das Quecksilber den Anblick eines Metallspiegels von großer Reinheit gewährt.

Dadurch, daß man Röhren von großem Durchmesser wählt, hat man den Vortheil, daß die Höhe der Quecksilbersäule durch die früher besprochene Capillardepression nicht geändert wird und nun mit aller Genauigkeit durch einen Maßstab, den man seitwärts anlegt, gemessen werden kann. Ein solcher Maßstab, der an seinem oberen Ende behufs genauerer Ablesung noch mit einer Loupe versehen ist, heißt ein Kathetometer.

In Fig. 64 ist ein solches feststehendes Normal-Barometer abgebildet, und man bemerkt daselbst noch eine kleine Schraube, welche an dem unteren Gefäße angebracht ist und als Stütze für das Kathetometer dient. Vor der Ablesung stellt man diese Schraube so, daß ihre Spitze den freien Quecksilberspiegel genau berührt, muß aber dann immer noch zu der Länge, die man auf dem Maßstabe abgelesen hat, die Länge der Schraube addiren, wenn man die Höhe der Quecksilbersäule genau bestimmen will.

Das Gefäßbarometer Fig. 65 unterscheidet sich von dem vorhergehenden dadurch, daß die aus Glas verfertigte Schale an der Röhre selbst befestigt ist und eine so große Oberfläche besitzt, daß man das Niveau des Quecksilbers in ihr trotz der Schwankungen des Barometers als constant ansehen kann. Das Brett, auf welchem das Instrument befestigt ist, trägt eine in Millimeter getheilte Scala, auf welcher ein Schlitten hin und her geschoben werden kann. An diesem Schlitten befindet sich ein Ring, welcher das Barometerrohr umfaßt und immer so eingestellt werden muß, daß sein oberer Rand sich genau in der Höhe des Quecksilberspiegels befindet. Die Scala muß so angebracht sein, daß ihr Nullpunkt mit dem unteren Spiegel zusammenfällt.

Da sich das Niveau des Quecksilbers im Gefäße beim Fallen des Barometers doch ein wenig hebt, beim Steigen aber wieder senkt, und da sich auch durch die Aenderung der Temperatur sowohl die Weite des Gefäßes und der Glasröhre, als auch das Volumen des Quecksilbers

Digitized by Google

ändert, so ist die Annahme, daß das Niveau im Gefäße unveränderlich ist, nicht ganz richtig, und man darf deshalb von diesem Barometer nicht dieselbe Genauigkeit verlangen, wie von dem vorher erwähnten; besonders ist es nothwendig, die Lage des Nullpunktes oder die Stellung der Scala von Zeit zu Zeit zu controliren.

Häufig benutzt man Barometer, die aus einem Stücke verfertigt sind: man biegt nämlich die Röhre selbst um und erweitert den offnen Theil zu einem Gefäße, das gewöhnlich die Form einer Birne besitzt, weshalb man diese Art als Birnbarometer bezeichnet (Fig. 66). Die Angaben dieses Instrumentes sind aber noch weniger genau als die des vorhin erwähnten. Viel richtiger ist es dann, den umgebogenen Theil nicht zu erweitern, den Maßstab aber an einer beweglichen Zahnstange anzubringen und seinen Nullpunkt vor jeder Ablesung auf das Niveau des Queckſilbers im freien Schenkel einzustellen. Solcher Art sind die Instrumente, an welchen der Luftdruck auf unseren meteorologischen Stationen abgelesen wird; man nennt sie Heberbarometer.

Die Einrichtungen, welche Fortin, Gay-Lussac und Bunten ihren Barometern gegeben haben, vermeiden jene Uebelstände; aber, da diese Physiker sich die Aufgabe gestellt hatten, Instrumente zu construiren, welche auf der Reise brauchbar und deshalb leicht transportabel sind, so wendeten sie Röhren an, deren Durchmesser kleiner war, als der der Röhre des Normalbarometers; hierdurch aber machte sich der Einfluß der Capillarität geltend und es muß jede Beobachtung mit Rücksicht auf diese Größe corrigirt werden.

Fig. 67. Gefäß des Fortin'schen Barometers.

Bei den Barometern von Gay-Lussac und Bunten wird die Queckſilberhöhe durch doppelte Ablesung am unteren und oberen Ende bestimmt; bei Fortin's Barometer dagegen wird der Nullpunkt durch eine sinnreiche Einrichtung, welche in Fig. 67 zur Anschauung gebracht ist, constant erhalten.

Die Abbildung zeigt uns einen Querschnitt des cylindrischen Gefäßes,

Digitized by Google

in welchem sich das Quecksilber befindet, und dessen Wand in seinem oberen Theile aus Glas besteht, sodaß man durch sie hindurch den Quecksilberspiegel sehen kann. Vom Deckel des Gefäßes geht in das Innere eine metallische Spitze, deren unteres Ende den Nullpunkt der Scala angiebt, sodaß bei jeder Beobachtung das Niveau des Quecksilbers

Fig. 68. Barometer nach Fortin; Einstellung auf der Reise.

genau bis zu ihr hinan reichen muß. Damit diese Einstellung nun möglich ist; besteht der untere Theil des Gefäßes aus einem Lederſack, der an den Wänden des Gefäßes befestigt ist, und dessen Stellung durch eine Schraube, welche durch den Boden hindurch geht, regulirt werden

Digitized by Google

kann. Wird diese Schraube weiter hinein gedreht, so wird der Beutel zusammengepreßt und dadurch das Niveau des Queckſilbers gehoben, durch die entgegengeſetzte Bewegung aber ſenkt es ſich wieder, ſodaß es jeder Zeit möglich iſt, das Niveau genau auf die Spitze und alſo auf den Nullpunkt der Scala einzuſtellen. Damit auf der Reiſe die Bewegungen des Queckſilbers die Röhre nicht zertrümmern, dreht man die Schraube ſo weit hinein, daß der ganze innere Raum mit Queckſilber erfüllt iſt und kehrt hierauf das Barometer um; um weiter zu verhindern, daß hierbei Luft in das Rohr kommt, iſt daſſelbe in eine Spitze ausgezogen, durch deren enge Oeffnung wohl das Queckſilber hin und herfließen, nicht aber Luft eindringen kann. Der ganze Apparat iſt in eine Röhre aus Meſſing eingeſchloſſen, welche ihn vor Stößen ſchützt und nur an der Stelle, wo ſich das Niveau des Queckſilbers in der Röhre befindet, von zwei langen Spalten durchbrochen iſt, welche einander gegenüber ſtehen und die Beobachtungen der Queckſilberſäule geſtatten; die Scala iſt ſelbſt auf den Rändern der Spalten eingeritzt. Führt man dieſes Barometer mit ſich auf der Reiſe, ſo befeſtigt man es an einem Dreifuß, wobei es ſich durch ſein eigenes Gewicht in ſenkrechte Lage einſtellt (Fig. 68).

Das Barometer nach Fortin iſt bei wiſſenſchaftlichen Reiſen ſehr gut zu gebrauchen, weil weder Luft in ſeine Röhre dringen kann, noch zu befürchten iſt, daß es durch die Stöße und Schwankungen beim Fahren zerbricht. Die Ableſungen ſind freilich nach der Capillarität zu corrigiren; auch muß man beachten, daß die Dichtigkeit des Queckſilbers ſich mit der Temperatur ändert, und daß alſo auch aus dieſem Grunde noch eine Correctur anzubringen iſt, um den wahren Werth des Luftdrucks zu ermitteln.

Fig. 69. Barometer nach Gay-Luſſac, verbeſſert durch Bunten.

Bei den von Gay-Luſſac conſtruirten Barometern ſind zwei Stücken einer und derſelben Röhre durch ein ziemlich enges Zwiſchenglied mit einander verbunden (Fig. 69); beide Röhren ſind geſchloſſen und nur im unteren Theile befindet ſich eine ſehr enge Oeffnung, durch welche wohl Luft eindringen, nicht aber Queckſilber ausfließen kann. Da die Röhren denſelben Durchmeſſer haben, ſo glaubte Gay-Luſſac, daß eine Correctur der Beobachtungen nach der Capillarität überflüſſig ſei; leider

Digitized by Google

hat man aber erkannt, daß die Wirkung dieser Kraft eine verschiedene ist, je nachdem sich über dem Quecksilber Luft oder ein luftleerer Raum befindet. Im Uebrigen ist dieses Instrument sehr bequem zu handhaben, da es wenig Platz einnimmt und also leicht transportirt werden kann, in welchem Falle man es immer vollständig umkehrt. Die Verbesserung, welche Bunten daran angebracht hat, besteht darin, daß die enge Zwischenröhre nach unten in einer feinen Spitze endigt, die von einem weiteren oben geschlossenen Theile umgeben ist: dringen nun wirklich Luftblasen

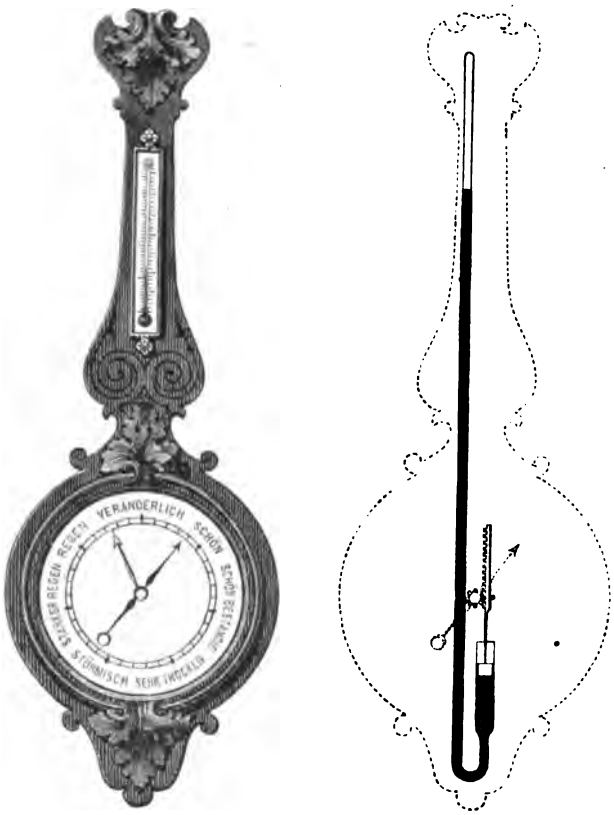


Fig. 70. Quadrantenbarometer.

in den unteren Theil der engen Röhre, so sammeln sich dieselben in dem ringförmigen Raume des etwas erweiterten Theiles, und können auf die Quecksilbersäule keinen Druck ausüben.

Um die Schwankungen des Luftdrucks in noch anderer Weise sichtbar zu machen, ersann der Physiker Hook eine Vorrichtung, das Quadrantenbarometer (Fig. 70), welches die Ablesung zwar sehr er-

Digitized by Google

leichtert aber nicht empfindlich genug ist, um großen wissenschaftlichen Werth zu besitzen, sodaß man es höchstens noch für Beobachtungen zu Zwecken des alltäglichen Lebens, mit anderen Worten als Wetterglas und Zimmerschmuck findet. Dieses Barometer hat die Einrichtung des Heberbarometers, nur daß sich auf dem freien Schenkel ein Schwimmer aus Elfenbein befindet, der mit den Schwankungen des Barometers gehoben wird oder wieder herabsinkt. Dieser Schwimmer dreht mittels eines Seidenfadens oder einer Zahnstange ein Rad, das einen Zeiger trägt, sodaß die Barometerschwankungen sich durch die Einstellungen dieses Zeigers auf einem Zifferblatte bemerklich machen, welches eine der Höhe des Queckſilbers entsprechende Theilung trägt.

Schließlich wollen wir noch der Aneroïdbarometer Erwähnung thun, die seit einigen Jahren eine sehr weite Verbreitung gefunden haben, und die auf der gegenseitigen Einwirkung des Luftdrucks und der Elasticität dünner Metallplatten beruhen. Bourdon hat durch Rechnung gefunden, daß eine Röhre aus dünnem Messingblech der Einwirkung des Luftdruckes leicht Folge leistet, wenn ihr Querschnitt eine flache Ellipse bildet, wenn sie dann fast zu einem vollen Kreise zusammengebogen und luftleer gemacht ist. Er befestigt eine solche Röhre, welche man einen Bourdon'schen Bügel nennt, in ihrem Mittelpunkte und verbindet die Enden mit einem zweiarmigen Hebel, durch welchen ein mit Zähnen versehener Kreisbogen in Bewegung gesetzt wird. Diese Zähne greifen in ein Zahnrad ein, das einen Zeiger trägt. Das Ganze ist in eine Dose eingeschlossen, auf deren Deckel sich rings herum eine Theilung befindet, auf welche der Zeiger einspielt, und deren Zahlen dem Stande des gewöhnlichen Barometers entsprechen. Wächst der Luftdruck, so wird der Bügel zusammengepreßt; derselbe dreht den Hebel, die Bewegung überträgt sich auf den Zeiger, welcher sich auf den Theilstrich einstellt, auf dem sich auch das Niveau des Queckſilbers eines gewöhnlichen Baro-

Fig. 71. Aneroïdbarometer nach Bourdon.

Digitized by Google

meters befinden würde: läßt der Luftdruck nach, so dehnt sich der Bügel wieder aus und der Zeiger macht die entgegengesetzte Bewegung.

Bei dem anderen Aneroïdbarometer, das häufig im Gebrauche ist und von Vidi erfunden wurde (Fig. 72), vertritt eine Dose, deren Deckel aus sehr dünnem, cannellirten Kupferblech besteht, und die luftleer gemacht ist, die Stelle des Bourdon'schen Bügels. Damit der Luftdruck diese Deckel nicht vollständig hineinpreßt, ist eine Feder an denselben angebracht, die sie immer von einander entfernt, und dadurch

Fig. 72. Aneroïdbarometer nach Vidi.

dem Drucke der Luft entgegen wirkt. Wächst der Luftdruck, so wird er die Kraft der Feder etwas überwinden und die Dose stärker zusammenpressen: läßt er wieder nach, so zieht die Feder den Deckel wieder in die Höhe. Diese Bewegungen werden durch ein sehr empfindliches, festanliegendes Hebelwerk wieder auf einen Zeiger übertragen, der die Stärke des Luftdruckes auf einem Theilkreise anzeigt.

Diese Barometer haben den großen Vortheil, daß sie sich sehr leicht

Digitized by Google

transportiren und sehr bequem handhaben lassen; auch sind ihre Angaben wenigstens viel genauer als die des Quadrantenbarometers. Der größte Uebelstand bei ihnen ist der, daß sich die Elasticität der Metalle mit der Zeit ein wenig ändert, und daß es deshalb nothwendig ist, ihre Scalen bisweilen nach dem Stande eines Normalbarometers zu berichtigen.

Siebentes Kapitel.

Schwere der Luft und der Gase.

§ 1. Die Pumpen. — Der Heber.

Wenngleich die Entdeckung, daß die Luft einen Druck ausübt, nicht viel über zweihundert Jahre alt ist, so ist die Anwendung dieses Druckes, wie schon aus der Entdeckungsgeschichte selbst hervorgeht, eine weit ältere: denn der Luftdruck ist es ja, welcher das Wasser in die Pumpenröhren hinauftreibt. Und während erst Galiläi und Torricelli die Theorie dieses Druckes aufstellten, soll die Pumpe bereits durch Ktesibius erfunden sein, einen berühmten Mathematiker und Physiker, welcher um 130 v. Chr., also ungefähr 100 Jahre nach Archimedes, in Alexandrien lebte.

Wir wollen jetzt die verschiedenen Arten von Pumpen in ihrer Einrichtung kennen lernen und uns dabei besonders mit dem Principe, das bei ihnen zur Wirkung kommt, sowie mit der Einrichtung der Ventile beschäftigen.

Taucht man das untere Ende eines hohlen Cylinders, dessen Boden eine Oeffnung besitzt und in welchem sich ein gut schließender Kolben auf- und abschieben läßt, unter Wasser, während sich der Kolben am unteren Ende befindet, und zieht man hierauf den Kolben mittels der Kolbenstange in die Höhe, so wird sich der Cylinder mit Wasser füllen. Denn wenn das Wasser dem Kolben nicht nachfolgte, so würde im unteren Theile des Cylinders ein luftleerer Raum entstehen: der Luftdruck, welcher auf dem äußeren Spiegel des Wassers lastet, muß also dasselbe in den inneren Raum hineindrücken, da in diesem ein Gegendruck nicht vorhanden ist (Fig. 73).

Nehmen wir an, der Cylinder habe eine Höhe von mehr als $10\frac{1}{3}$ m. und es sei genug Wasser vorhanden, so wird dasselbe dem Kolben bis

Digitized by Google

auf $10^1/_3$ Höhe folgen. Sobald es dort angelangt ist, so beträgt sein Gewicht nun ebensoviel, als der Druck der äußeren Luft, und es wird daher nicht weiter aufsteigen, wenn man auch den Kolben noch weiter hebt. Dies der Grund, weshalb es den Pumpenmachern von Florenz nicht gelang, das Wasser in einem zu tiefen Brunnen bis an die Oberfläche zu heben.

Fig. 73. Princip der Saugpumpe.

In der angeführten Weise werden gewöhnlich die Handspritzen gefüllt, und auf demselben Principe beruht die Einrichtung der gebräuchlichsten Art von Pumpen, der sogenannten Saugpumpen, die ihren Namen daher erhalten haben, daß der Kolben bei seiner Hebung die Flüssigkeit gleichsam hinaufsaugt. Bei diesen Pumpen hat das eigentliche Brunnen- oder Steigrohr noch eine Fortsetzung, welche in einer engeren Röhre besteht und Saugrohr heißt, und diese taucht mit ihrer Spitze in das Wasser. Da wo Steigrohr und Saugrohr an einander stoßen, ist eine Klappe, die sich nur nach oben öffnen kann, und ebenso ist der Kolben an einer oder mehreren Stellen durchbohrt und jede dieser Oeffnungen durch eine ähnliche Klappe geschlossen (Fig. 74). Es ist nun leicht einzusehen, was vorgehen muß, wenn man den Kolben abwechselnd hebt und senkt. Beim ersten Hube wird sich die Luft, die sich unter dem Kolben befindet ausdehnen und folglich nicht mehr so stark drücken, als zuvor: daher wird der äußere Luftdruck etwas Wasser in das Saugrohr hineinpressen, wodurch die Luft aus dem Saugrohre unter der Klappe hinweg in das Steigrohr gedrängt wird. Senkt man nun den Kolben wieder, so drückt man die Luft im Steigrohre zusammen, wodurch sich

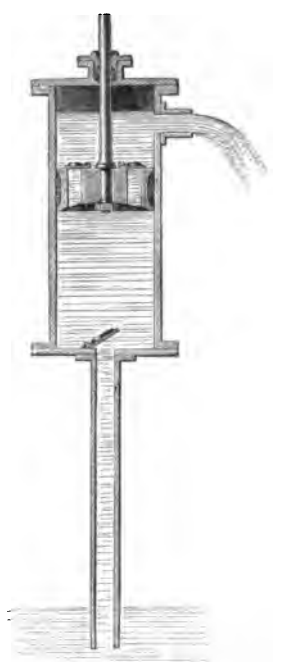


Fig. 74. Saugpumpe.

Digitized by Google

die Klappe am Saugrohre schließt, und es kann die zusammengedrückte Luft nur durch die Durchbohrungen des Kolbens entweichen, indem sie die Klappen daselbst aufstößt. Mit jedem neuen Hube wird sich derselbe Vorgang wiederholen, sodaß das Wasser endlich aus dem Saugrohre in das Steigrohr und durch die Oeffnung des Kolbens über denselben gelangt, um endlich aus einer Oeffnung zu fließen, die an einer Seite des Steigrohres angebracht ist.

Welche Kraft man anwenden muß, um den Kolben zu bewegen, ist leicht einzusehen. Wenn man den Kolben herabdrückt, so sind seine Klappen geöffnet, der Druck, den die Flüssigkeit auf ihn ausübt, ist also von beiden Seiten nahezu gleich und hebt sich daher auf: man hat also blos den Widerstand zu überwinden, den die Reibung der Wassertheilchen und des Kolbens gegen die Röhrenwand hervorbringt. Hebt man dagegen den Kolben, so hebt sich nur der Luftdruck, der auf der freien Wasserfläche lastet, gegen den auf, der im Innern der Röhre auf das Wasser drückt: man muß also eine Wassersäule heben, deren Grundfläche gleich der Oberfläche des Kolbens und deren Höhe gleich dem senkrechten Abstande der beiden Wasserspiegel ist. Beträgt dieser Abstand z. B. 2^{m}, die Oberfläche des Kolbens aber 1^{qdm}, so hat man bei jedem Hube ein Gewicht von 20 Kgr. zu heben, die Reibungswiderstände ungerechnet.

Nach der Theorie könnte man annehmen, daß man die Länge der Brunnenröhre bis auf 10^{m} steigern könnte: die Erfahrung hat aber gezeigt, daß eine Länge von 7 bis 8^{m} das Aeußerste ist, wozu man gelangen kann. Dies liegt daran, daß der Kolben und die Klappen niemals so genau schließen, daß sich nicht etwas Luft zwischen ihnen hindurch drängen könnte; außerdem befindet sich im Wasser immer etwas Luft in Form von kleinen Blasen, die sich in der Röhre, wo auf dem Wasser nur noch ein geringer Druck lastet, oben sammelt und gegen den Atmosphärendruck einen, wenn auch geringen, Gegendruck ausübt.

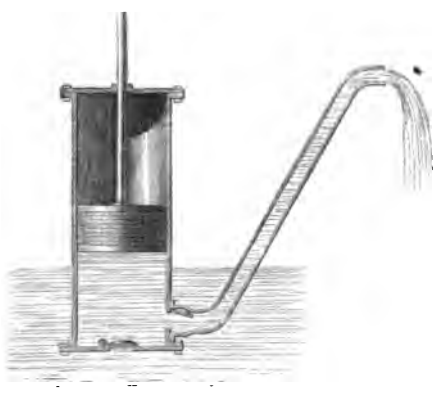


Fig. 75. Druckpumpe.

Digitized by Google

Bei der Druckpumpe (Fig. 75) taucht das Brunnenrohr so tief in Wasser ein, daß die Flüssigkeit schon durch den hydrostatischen Druck, wie bei communicirenden Röhren eindringt, ist aber auch durch eine Klappe, die sich nur nach oben öffnet, geschlossen. Vom unteren Ende des Rohres zweigt sich ein Seitenrohr ab, das bald aufsteigt und eine Klappe enthält, die sich nur nach außen öffnet. Der Kolben endlich ist nicht durchbrochen, sodaß, wenn er gehoben wird, das Wasser in das Brunnenrohr eindringt, daß er aber beim Senken dasselbe in die Seitenröhre hineinpreßt. Die Saugdruckpumpe endlich vereinigt in sich beide Systeme, wie aus Fig. 76 deutlich zu ersehen ist.

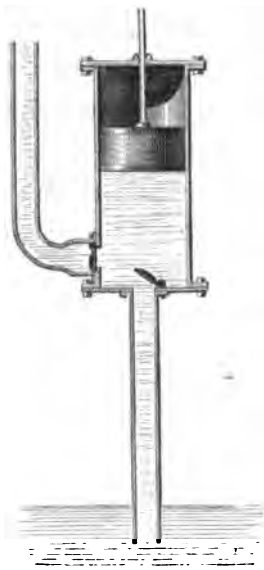


Fig. 76. Saugdruckpumpe.

Wir kommen nunmehr zur Beschreibung des Hebers, eines Instrumentes, welches zur Ueberführung einer Flüssigkeit aus einem Gefäße in ein anderes häufig angewendet wird und dessen Wirksamkeit ebenfalls auf der Benutzung des Luftdrucks beruht.

Der Heber besteht aus einer Röhre, welche so gebogen ist, daß die beiden Schenkel verschiedene Länge besitzen (Fig. 78); diese Röhre wird mit der Flüssigkeit gefüllt und mit ihrem kürzeren Ende in das Gefäß getaucht, welches entleert werden soll. Sobald dies ausgeführt ist, beginnt die Flüssigkeit aus der Oeffnung des längeren Schenkels auszufließen, und diese Bewegung dauert so lange fort, als der kürzere Schenkel noch unter den Flüssigkeitsspiegel taucht.

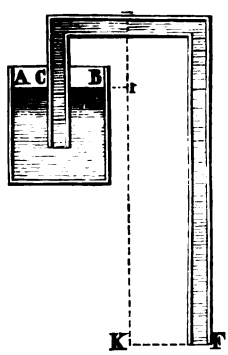


Fig. 77. Theorie des Hebers.

Fragt man nach dem Grunde dieser Erscheinung, so muß man den Druck bestimmen, den sowohl die Luft, als auch die Flüssigkeitssäulen auf die einzelnen Punkte ausüben. Nun ist der Druck der Luft auf den Spiegel AB der Flüssigkeit im Gefäße so gut wie nicht verschieden von dem Druck der Luft, der am freien Ende F der Röhre stattfindet

Digitized by Google

(Fig. 77), sodaß diese beiden Kräfte sich gegenseitig aufheben und nur dazu dienen, sowohl an der Stelle C, wo die Röhre in das Gefäß taucht, als auch beim Punkte F die Flüssigkeit in der Röhre zu erhalten. Lägen nun diese beiden Punkte in gleicher Höhe, so würde auf keiner Seite ein Ueberschuß von Kraft vorhanden sein, mithin könnte auch keine Bewegung stattfinden. Da nun aber der freie Schenkel länger ist, so hält sich nur das Wasser, welches sich oberhalb des Niveau AB befindet, in der Röhre im Gleichgewicht; es bleibt also noch der Druck der Wassersäule von der Höhe IK, welcher das Ausfließen veranlaßt. Wollte

Fig. 78. Der Heber.

man nun annehmen, daß die Säule IK für sich allein ausflösse, so müßte bei I ein luftleerer Raum entstehen, was aber dadurch verhindert wird, daß der Luftdruck auf das Niveau AB die Flüssigkeit aus dem Gefäße immer wieder nachpreßt, sodaß das Fließen ununterbrochen fortdauert. Nur wenn man Heber gebrauchen wollte, deren höchster Punkt mehr als $10^1/_3{}^m$ hoch über dem Flüssigkeitsspiegel liegt, so würden dieselben für das Wasser ihren Dienst versagen: beim Quecksilber würde schon eine Höhe von 76^{cm} dazu genügen.

Je nach der Natur der Flüssigkeit, die man überfließen lassen will, giebt man den Hebern verschiedene Formen und wendet verschiedene

Digitized by Google

Arten an, um den Heber zuerst zu füllen: bei Flüssigkeiten, die uns nicht schädlich oder unangenehm sind, genügt ein Ansaugen mit dem Munde am längeren Schenkel, nachdem der kürzere eingetaucht ist.

Auch die Höhlungen der Erde scheinen manchmal die Form von Hebern anzunehmen, wodurch manche merkwürdige Veränderungen im Wasserstande von Seen sich erklären lassen. So giebt es im Karstgebirge einen merkwürdigen See in der Nähe der Stadt Zirknitz, der von Zeit zu Zeit ziemlich schnell austrocknet und dann erst wieder durch unterirdische Quellen gespeist wird. Man vermuthet, daß der Grund dieses Sees mit röhrenförmigen Höhlen in Verbindung steht, welche erst nach oben ansteigen, um sich darauf wieder zu senken. Ist dies der Fall, so wird sich der See füllen bis sein Niveau in gleiche Höhe mit dem höchsten Punkte der Höhle fällt, worauf aber ein Abfließen stattfinden muß, das so lange währt, als sich noch Wasser im See befindet.

Nachdem wir nunmehr einige der wichtigsten Wirkungen des Luftdruckes kennen gelernt haben, wenden wir uns zu den Apparaten, welche dazu dienen, die Luft in einem Gefäße zu verdünnen oder auch zu verdichten; zum Schlusse aber werden wir untersuchen, durch welche Mittel man den Druck der Gase bestimmt und nach welchen Gesetzen dieser Druck sich ändert, wenn man das Volumen, das sie einnehmen, vergrößert oder verkleinert.

§ 2. Ausdehnung und Zusammendrückung der Gase. — Die Luftpumpe.

Der Torricelli'sche Versuch hat uns ein sehr einfaches Mittel angegeben, durch welches man einen luftleeren Raum herstellen kann; denn in dem oberen Theile der Barometerröhre, in der sogenannten Torricelli'schen Leere, befinden sich nur noch Quecksilberdämpfe, die aber so dünn sind, daß man sie wohl vernachlässigen darf. Wenn aber dieses Verfahren auch einfach ist, so läßt es sich praktisch nicht anwenden: denn um aus einem nur mäßig großen Raume die Luft zu entfernen, würde ungemein viel Quecksilber erforderlich sein, und weiter würden die Vorsichtsmaßregeln, die man bei jedem Versuche treffen müßte, um das Eindringen der Luft zu verhindern, das Handhaben eines solchen Apparates

Digitized by Google

sehr erschweren. Daher hat man bald nach Torricelli sich bemüht, andere Mittel zu ersinnen, durch welche sich die Luft verdünnen läßt.

So gelang es denn im Jahre 1654 dem Bürgermeister von Magdeburg, Otto von Guericke, einen Apparat zu construiren, der noch heute zu diesem Zwecke Anwendung findet, nämlich die Luftpumpe, und mit diesem Instrumente merkwürdige Versuche auszuführen, von denen wir einige bereits erwähnt haben. Um die Verbesserung der Luftpumpe aber haben sich verschiedene Physiker, in der ersten Zeit besonders Boyle, Papin, Muschenbroek und Gravesande, Verdienste erworben.

Die Luftpumpe besteht zunächst aus einer cylindrischen Röhre, dem Stiefel, von welcher aus ein engeres Rohr führt, das in der Mitte eines Tellers endigt, der gut abgeschliffen ist und auf welchen Glasglocken, die sogenannten Recipienten, aufgesetzt werden können. Durch gewisse Ventile können die einzelnen Theile des Apparates unter einander oder mit der äußeren Luft in Verbindung gesetzt oder auch abgesperrt werden. Der Einfachheit wegen wollen wir vorläufig, um die Einrichtung deutlich zu machen, annehmen, daß nur das Verbindungsrohr und ebenso eine Durchbohrung des Kolbens durch einfache Klappen geschlossen seien, so wie es Fig. 79 zeigt.

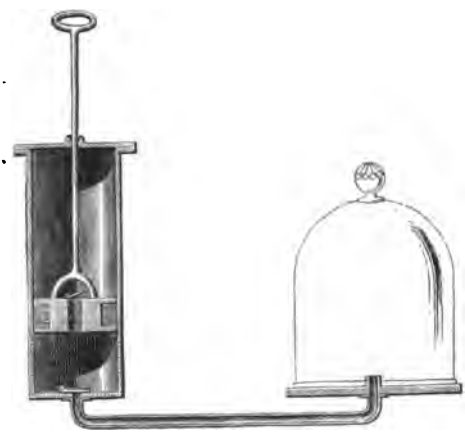


Fig. 79. Spiel des Kolbens und der Klappen bei der Luftpumpe.

Denken wir uns, daß der Kolben an seinem tiefsten Punkte sei, wenn man den Recipienten aufsetzt, so wird der letztere mit Luft von der Dichtigkeit der atmosphärischen Luft erfüllt sein. Hebt man nun den Kolben, sodaß eigentlich unterhalb desselben im Stiefel ein luftleerer Raum entstehen würde, so wird die Luft des Recipienten vermöge ihrer Elasticität die Klappe am Verbindungsrohre aufstoßen und in den Stiefel eindringen; sie verbreitet sich also über einen größeren Raum und wird dadurch verdünnt. Drückt man den Kolben nun wieder herunter, so verdichtet man die Luft im Stiefel, diese übt einen Druck auf die Klappe aus und schließt dieselbe, wogegen sie die Klappe, welche die Oeffnung

Digitized by Google

des Kolbens schließt, aufstößt und auf diesem Wege entweicht, sobald ihre Dichtigkeit durch das Zusammenpressen die Dichtigkeit der äußeren Luft übersteigt. Setzen wir z. B. den Fall, daß der Inhalt des Stiefels, wenn der Kolben seinen höchsten Punkt erreicht hat, dem des Recipienten gleich ist, so wird beim ersten Hube nach dem Gesetze, von welchem der nächste Paragraph handelt, die Dichtigkeit der Luft auf die Hälfte ihres vorigen Werthes gebracht. Wird nun der Kolben wieder gesenkt, so ändert sich nicht die Dichtigkeit der Luft im Recipienten, die Luft im Stiefel aber wird wieder zusammengedrückt und erreicht die Dichtigkeit der äußeren Luft, sobald der Kolben die Mitte des Stiefels erreicht hat; von diesem Punkte an aber übertrifft ihre Dichtigkeit die der Atmosphäre: die Klappe wird aufgestoßen und alle Luft entweicht, bis der Kolben am Boden anlangt. Wiederholt man dieselbe Bewegung bei den vorausgesetzten Dimensionen des Recipienten und Stiefels, so wird die Luft beim zweiten Zuge auf den vierten, beim dritten auf den achten, beim vierten auf den sechzehnten Theil ihrer ursprünglichen Dichtigkeit gebracht. Sind die Verhältnisse der Volumina von Recipient und Stiefel andere, so ändert sich natürlich auch das Verdünnungsverhältniß bei den einzelnen Zügen.

Weil Klappen niemals dicht genug schließen und auch immer Hohlräume enthalten, in denen atmosphärische Luft zurückbleibt, sogenannte schädliche Räume, so wendet man an ihrer Stelle Ventile anderer Art an, von denen wir nur den am häufigsten angewendeten Senguerd'schen Hahn erwähnen wollen. Derselbe besitzt eine doppelte Durchbohrung, von denen die eine quer hindurch geht, die andere aber, die von der ersten um 90° entfernt ist, zwar auch von der Seite her eindringt, sich dann aber nach der Spitze des Dornes wendet und dort mit der freien Luft in Verbindung steht. Dieser Dorn ist an der Stelle eingesetzt, wo der Stiefel in das ihm gegenüberstehende Verbindungsrohr übergeht; der Stiefel aber spitzt sich kegelförmig zu und der Kolben, welcher nicht durchbohrt ist, paßt in diese kegelförmige Verlängerung und schließt an den Dorn genau an. Man kann dem Dorne daher folgende Stellungen geben: 1) man stellt ihn so, daß Stiefel und Recipient durch die quer hindurch gehende Durchbohrung in Verbindung gesetzt sind; dies geschieht, wenn der Kolben zurückgezogen und dadurch die Luft im Recipienten verdünnt werden soll; 2) man setzt den Stiefel durch die zweite Durch-

Digitized by Google

bohrung mit der äußeren Luft in Verbindung und schließt dabei den Recipienten ab, wenn man die Luft aus dem Stiefel austreiben will; endlich 3) läßt man nach Beendigung des Versuches die Luft in den Recipienten wieder einströmen, indem man den Dorn in die Stellung bringt, die der zweiten genau entgegengesetzt gerichtet ist.

Fig. 80. Einrichtung des Kolbens und der Ventile.

Um etwas schneller zum Ziele zu gelangen, verbindet man häufig den Recipienten mit zwei Stiefeln; und wir wollen jetzt die Einrichtung einer solchen zweistiefeligen Luftpumpe mit Benutzung der Figuren 80 bis 83 kennen lernen. Fig. 80 zeigt uns zunächst die Einrichtung der Ventile: der Kolben ist hier wieder durchbohrt und die Oeffnung durch eine kleine Platte a geschlossen, welche durch eine nicht sehr starke Spiralfeder gegen die Oeffnung gepreßt wird, sodaß schon ein schwacher Druck von unten sie öffnet und die Luft ausströmen läßt. Das Verbindungsrohr wird durch einen Kegel b abgeschlossen, an dem sich eine Stange befindet, deren Länge nur um ein Weniges geringer ist, als die Höhe des Stiefels, und die mit harter Reibung durch den Kolben C hindurchgeht. Wird also der Kolben gehoben, so wird der Kegel aus der Oeffnung entfernt und die Verbindung zwischen Stiefel und Recipient hergestellt: doch kann sich der Kegel nicht weit von der Oeffnung entfernen, weil die Stange sehr bald an den Deckel des Stiefels anstößt, sodaß sich die Oeffnung beim Senken des Kolbens sofort wieder schließt. Die Kolben der beiden aufrecht stehenden Stiefel sind an Zahnstangen be-

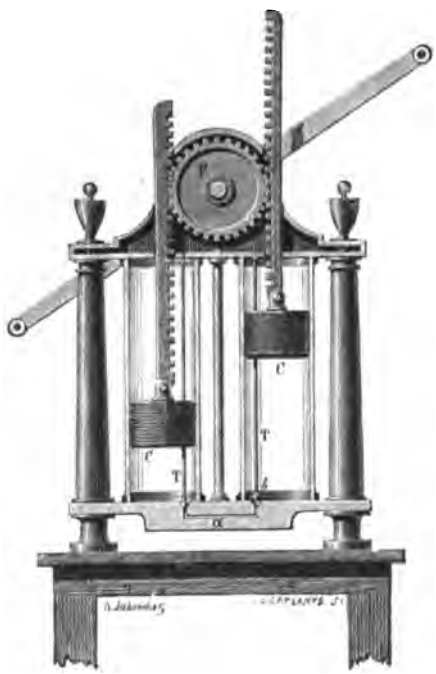


Fig. 81. Querschnitt der zweistiefeligen Luftpumpe.

Digitized by Google

festigt (Fig. 81), in welche ein und dasselbe Zahnrad eingreift; wird dieses Rad mittels einer Kurbel gedreht, so wird gleichzeitig der eine Kolben gehoben und der andere gesenkt, sodaß man durch dieselbe Umdrehung die beiden Kolbenbewegungen zugleich ausführt und somit schneller zum Ziele kommt. Der größte Vortheil dieser Einrichtung liegt aber in folgendem Umstande: wenn man den einen Kolben nach oben bewegt, so muß man den ganzen Luftdruck, der auf ihm lastet, aufheben; derselbe Druck lastet aber auch auf dem anderen Kolben, der sich senkt. Da nun die Luft unter diesem Kolben allmählich immer dünner wird, so wird der Gegendruck von unten immer geringer, der Druck der äußeren Luft auf einen Kolben wird durch den Druck auf den anderen Kolben immer mehr ausgeglichen und der Experimentator hat um so leichteres Arbeiten, je mehr die Verdünnung der Luft zunimmt.

Fig. 82 und 83 endlich geben den Grundriß und die äußere Ansicht der zweistiefeligen Luftpumpe. Man sieht, wie die beiden Stiefel unter sich durch einen Canal zusammenhängen, der einen Arm nach der Mitte des Tellers aussendet, jener vollkommen ebenen, gut polirten Glasplatte, auf welche die Glasglocken, die als Recipienten dienen, aufgesetzt werden, nachdem ihr Rand mit einem Fette bestrichen ist. Haben die Recipienten die Gestalt von Röhren, Ballons, u. s. w., so können sie unmittelbar auf das Ende des Verbindungsrohres aufgeschraubt werden. Ungefähr in der Mitte des Verbindungsrohres befindet sich ein Senguerd'scher Hahn, dessen Einrichtung oben beschrieben wurde. Endlich erhebt sich über dem Verbindungscanale vor dem Teller auf einem Zuleitungsrohre ein geschlossenes Glasgefäß, welches durch einen Hahn abgesperrt oder mit den Recipienten in Verbindung gesetzt werden kann. In diesem Gefäße sieht man ein sehr verkürztes Barometer, das durch seinen Stand anzeigt, bis zu welchem Grade die Luft verdünnt ist, d. h. welcher Quecksilbersäule sie durch ihren Druck das Gleichgewicht hält: man nennt diese Vorrichtung eine Barometerprobe oder ein Manometer.

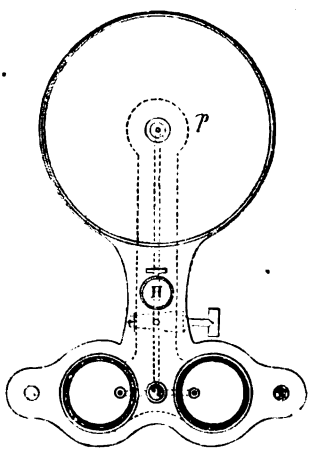


Fig. 82. Grundriß der zweistiefeligen Luftpumpe.

Digitized by Google

Noch hat der Physiker Babinet an dieser Luftpumpe eine sehr sinnreiche Vorrichtung angebracht, durch welche die Verdünnung auf einen weit höheren Grad gebracht werden kann. Hat man nämlich die Luft schon bis zu einem gewissen Grade verdünnt, so dreht man einen Hahn um, wodurch die Verbindung des einen Stiefels, nehmen wir an des rechten, mit dem Recipienten unterbrochen, dafür aber eine Verbindung zwischen beiden Stiefeln hergestellt wird. Von nun an wird also nur

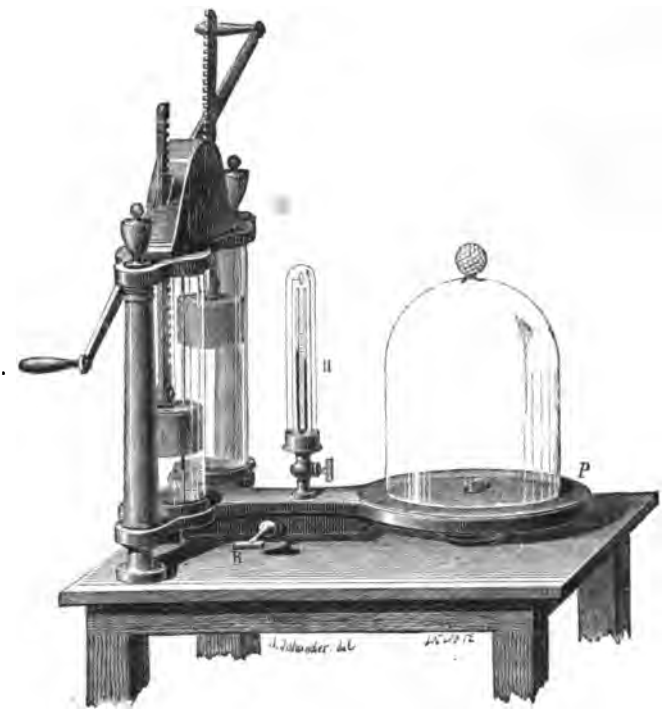


Fig. 83. Aeußere Ansicht der Luftpumpe.

noch der linke Kolben die Luft des Recipienten aufsaugen, der rechte Kolben aber durch seine Bewegungen die Luft im linken Stiefel weiter verdünnen. Ist nun noch im linken Stiefel ein schädlicher Raum vorhanden, so wird sich derselbe nicht mehr mit atmosphärischer Luft, sondern mit der stark verdünnten Luft des rechten Stiefels füllen, sein Einfluß wirkt also weit weniger nachtheilig.

Die Luftpumpe von Bianchi ist zwar einstiefelig, der innere Raum des Stiefels wird aber durch den Kolben selbst in zwei Abtheilungen getheilt, welche abwechselnd mit dem Recipienten in Verbindung gesetzt

Digitized by Google

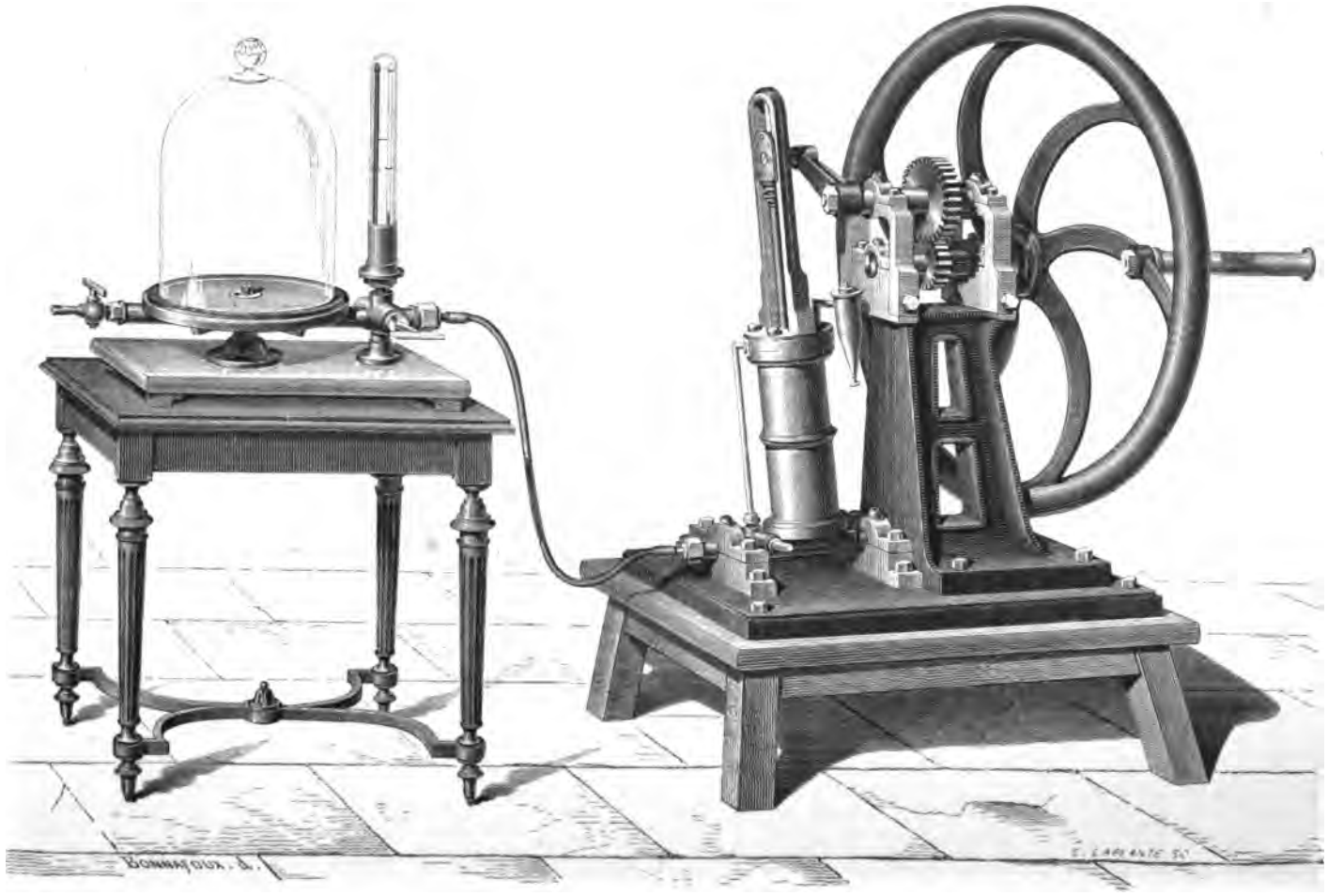
werden und in denen die Luft abwechselnd verdünnt wird, wie aus Fig. 84 zu erkennen ist. Die beiden Kegel, welche die Verbindungsrohre beider Abtheilungen schließen, sind an einer gemeinsamen Stange befestigt, sodaß sich das eine Rohr öffnet, sobald das andere geschlossen wird; der Kolben aber und die Kolbenstange sind durchbohrt und die Oeffnung ist durch eine Klappe geschlossen, die durch eine Spiralfeder angedrückt wird: eine ebensolche Vorrichtung befindet sich auch im Deckel, sodaß, wenn sich der Kolben senkt, die Luft des unteren Faches durch die Kolbenstange, wenn er sich hebt, die des oberen durch den Deckel entweicht. Die Bewegung des Kolbens wird durch Drehung einer Kurbel, die in ein Räderwerk eingreift, bewirkt und durch ein großes Schwungrad gleichmäßig erhalten; auch überträgt sich die Rotationsbewegung unmittelbar auf den Kolben, da der Stiefel in einer senkrechten Ebene nach beiden Seiten hin ausweichen kann (Tafel II). Mit Hülfe dieser Pumpe ist es möglich, die Luft in sehr großen Recipienten in kürzester Zeit zu verdünnen.

Fig. 84. Luftpumpe nach Bianchi. Querschnitt des Stiefels.

Wir haben schon früher einige sehr wichtige Versuche, die mit der Luftpumpe ausgeführt werden, erwähnt, und auch im Folgenden, in der Lehre vom Schall, von der Wärme und der Electricität, werden wir noch mehrere Anwendungen dieses sehr wichtigen Instrumentes kennen lernen: jetzt wollen wir uns nur auf einige Versuche aus der Lehre von der Schwerkraft beschränken.

Bringt man unter den Recipienten einer Luftpumpe ein Glas mit Wasser, so sieht man, daß sich nach einigen Kolbenzügen Luftblasen an die Wände des Gefäßes anlegen, welche immer größer werden, je mehr die Luft verdünnt wird, und endlich an die Oberfläche hinaufsteigen: man sieht hieraus, daß sich im Wasser stets aufgelöste Luft befindet, die durch den atmosphärischen Druck am Aufsteigen gehindert wird. Diese Luft athmen die Fische durch ihre Kiemen. Rauch, welcher sich in der Atmosphäre über die unteren Luftschichten erhebt, fällt im luftleeren Raume nieder, wie ein schwerer Körper. Wir wollen hier eines

Digitized by Google



Luftpumpe von Bianchi, Gesammtansicht.

Digitized by Google

LIBRARY
THE
UNIVERSITY
OF
CALIFORNIA

Digitized by Google

weit verbreiteten Irrthums gedenken, der sich durch das Vorhergehende leicht widerlegen läßt. Sieht man den Rauch der Schornsteine sich bald senken und am Boden hinziehen, so kann man oft die Meinung hören, die Luft sei schwer, sie drücke den Rauch nieder: im Gegentheil ist aber gerade dann die Luft sehr leicht, der Rauch sinkt in ihr, ähnlich wie im luftleeren Raume, während schwere Luft ihn zum senkrechten Emporwirbeln bringt. Man sieht hieraus, daß das Archimedische Princip für die Gase ebensogut seine Gültigkeit hat, wie für die Flüssigkeiten: auch in der Luft verliert jeder Körper so viel an Gewicht, als die von ihm verdrängte Luft wiegt.

Dasselbe läßt sich mit einer kleinen Vorrichtung nachweisen, die Otto von Guericke erfunden hat und mit dem Namen Baroskop bezeichnete. An den Armen eines Wagbalken sind zwei Metallkugeln angehängt, von denen die eine hohl und im Innern mit Luft erfüllt ist, die aber nicht entweichen kann, während die andere massiv ist und ein kleineres Volumen besitzt (Fig. 85). Hat man nun die Einrichtung so getroffen, daß sich beide Kugeln in der Luft das Gleichgewicht halten, so wird man sehen, daß sich unter dem Recipienten der Luftpumpe die Wage sofort auf die Seite der größeren Kugel neigt, sobald man die Luft verdünnt. Läßt man wieder Luft einströmen, so stellt sich das Gleichgewicht wieder her. Man sieht also, daß die umfangreichere Kugel in Wirklichkeit größeres Gewicht besitzt; sie verdrängt aber mehr Luft und verliert dadurch auch mehr an ihrem Gewichte, sodaß es scheint, als ob das Gewicht beider Kugeln in der Luft dasselbe sei. Will man daher das genaue Gewicht eines Körpers haben, so müßte man die Wägung im luftleeren Raume ausführen: da dies nun nicht möglich ist, so ergiebt sich hieraus die Nothwendigkeit, bei feinen physikalischen und chemischen Untersuchungen das Gewicht der verdrängten Luft mit in Rechnung zu ziehen.

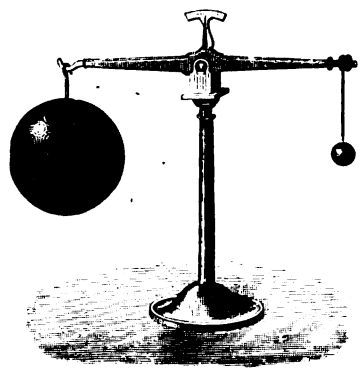


Fig. 85. Baroskop.

Will man in einem Gefäße die Luft oder andere Gase verdichten, so benutzt man dazu Apparate, welche man Compressionspumpen nennt, und deren Einrichtung mit der der Luftpumpe übereinstimmt, nur daß

Digitized by Google

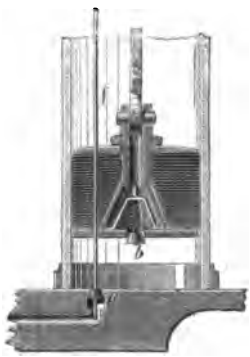


Fig. 86. Compressionspumpe; Durchschnitt des Stiefels.

sich alle Ventile nach der entgegengesetzten Seite hin öffnen. Wird z. B. der Kolben (Fig. 86) gehoben, so schließt der Kegel a den Kanal, der nach dem Gefäße führt; dafür drückt die äußere Luft das Ventil b auf und drängt in den Raum unter dem Kolben. Senkt sich der Kolben, so schließt sich das Ventil b, aber die Stange f drückt den Kegel a ein wenig herab, sodaß nun die Luft in das Gefäß gedrängt wird. Man benutzt jetzt meistens die Compressionspumpe nach Silbermann, deren Einrichtung aus Fig. 87 und 88 zu ersehen ist. Bei derselben ist der Kolben nicht durchbohrt, am Grunde aber befinden sich zwei Kanäle, die in Röhren endigen, und

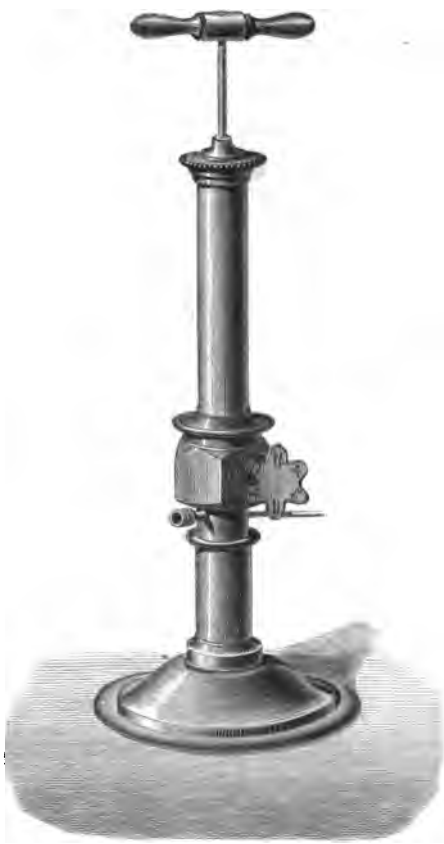


Fig. 87. Compressionspumpe nach Silbermann; äußere Ansicht.

Fig. 88. Compressionspumpe nach Silbermann; Durchschnitt.

Digitized by Google

von denen der eine durch ein Kegelventil geschlossen ist, das nach innen schlägt, während sich das Ventil des anderen nur nach außen öffnet. Man kann diese Pumpe ebensogut als Compressionspumpe, wie als Luftpumpe benutzen: nur kann im letzteren Falle die Verdünnung nicht sehr weit getrieben werden, da der schädliche Raum bei den Ventilen zu groß

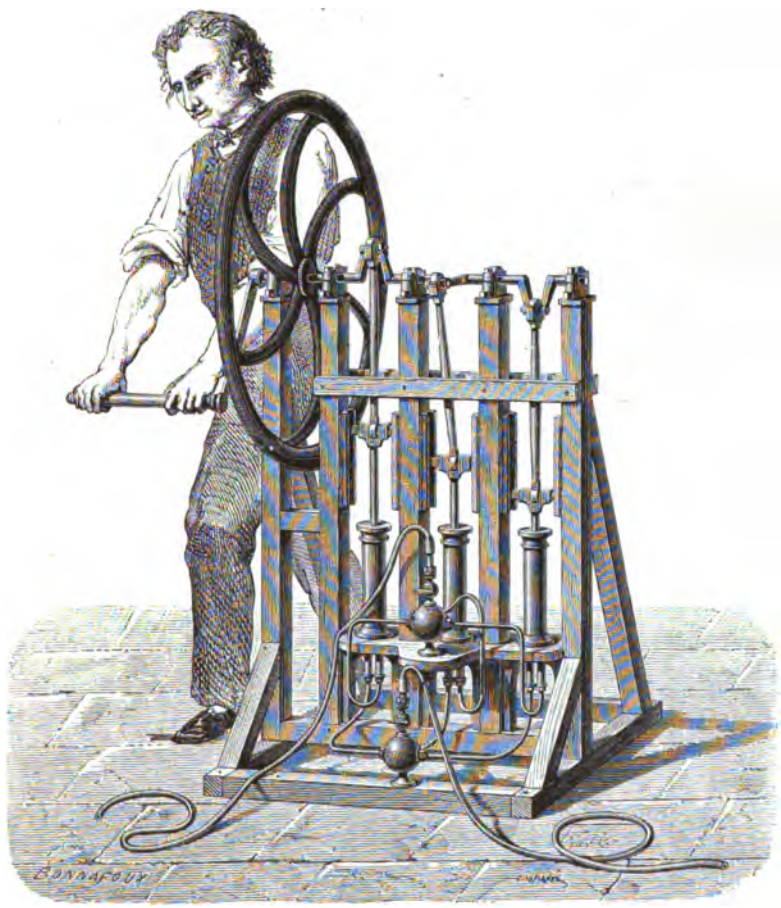


Fig. 89. Gekoppelte Compressionspumpen.

ist. Will man eine starke Compression in kurzer Zeit herbeiführen, so koppelt man mehrere solche Pumpen in solcher Weise, wie es Fig. 89 anzeigt. Durch solche Vorrichtungen hat Regnault einen Druck von 30 Atmosphären erzeugt, der mithin eine Quecksilbersäule von 22,80 m im Gleichgewicht halten könnte.

Digitized by Google

§ 3. Das Mariotte'sche Gesetz.

Wie wir gesehen haben, wird das Volumen der Luft auf einen geringeren Raum zusammengedrängt, sobald der Druck wächst, der auf ihr lastet: läßt dieser Druck nach, so dehnt sich auch die Luft vermöge ihrer Elasticität wieder aus. Es fragt sich nun, in welchem Zusammenhange das Volumen der Gase mit dem Drucke steht, der auf ihnen lastet. Diese Fragen haben fast gleichzeitig die Physiker Boyle und Mariotte einer eingehenderen Prüfung unterworfen und beide haben, unabhängig von einander, folgendes Gesetz erkannt, welches gewöhnlich mit dem Namen des letztgenannten Naturforschers bezeichnet wird:

Fig. 90. Experimenteller Nachweis des Mariotte'schen Gesetzes.

Wird ein und dieselbe Gasmenge nach einander verschiedenen Drucken unterworfen, so verhalten sich ihre Volumina umgekehrt wie die Druckkräfte.

Experimentell kann man dieses Gesetz in folgender Weise bestätigen. Man nehme eine lange, gekrümmte Röhre, deren kürzerer Schenkel geschlossen ist und bringe an der Seite derselben eine Theilung in der Weise an, daß der Rauminhalt zwischen je zwei Theilstrichen immer von derselben Größe ist (Fig. 90). Ist die Röhre gut cylindrisch, so werden die Theilstriche gleichen Abstand von einander haben; ist sie dagegen nicht ganz regelmäßig, so werden die Theilstriche bei den weiteren Theilen der Röhre näher zusammen, bei den engeren dagegen weiter auseinander fallen. In diese Röhre bringe man etwas Quecksilber und gleiche es so ab, daß dasselbe auf beiden Seiten gleich hoch steht und bis an den Nullpunkt der Scalen heranreicht, so wird der Druck der äußeren und der im kürzeren Schenkel gefangenen Luft sich im Gleichgewicht halten: auf der eingeschlossenen Luft lastet also der Druck von einer Atmosphäre.

Gießt man in den längeren Schenkel Quecksilber nach, so wird

Digitized by Google

dadurch der Druck vergrößert und die Luft im kürzeren Schenkel stärker zusammengedrückt. Nehmen wir z. B. an, daß ihr ursprüngliches Volumen sich über 24 Theilstriche der Scala erstreckte, und sehen wir zu, wie hoch die Quecksilbersäule ist, sobald die Luft bis auf den 12. Theilstrich hinauf gedrängt ist, so werden wir finden, daß das Niveau des Quecksilbers im freien Schenkel über dem Niveau im geschlossenen Schenkel genau so hoch steht, als der augenblickliche Barometerstand beträgt. Zu dem Drucke der Luft ist also noch der Druck dieser Quecksilbersäule hinzugekommen, der selbst wieder soviel wie eine Atmosphäre beträgt: die eingeschlossene Luft hat den Druck zweier Atmosphären auszuhalten und ist dadurch auf die Hälfte ihres Volumen zusammengedrückt.

Bei weiterem Nachgießen von Quecksilber wird man finden, daß die Luft bis auf den 16., 18., 19,2. Theilstrich zurückgedrängt, ihr Volumen also auf den 3., 4., 5. Theil vermindert wird, wenn sich der Druck auf 3, 4, 5 Atmosphären steigert. In ähnlicher Weise läßt sich die Giltigkeit des Gesetzes nachweisen, wenn sich der Druck vermindert. Eine nothwendige Bedingung für das Gelingen dieser Versuche ist noch die, daß sich die Temperatur bei denselben nicht ändert, indem bei steigender Temperatur die Gase sich sehr stark ausdehnen, wie wir später erwähnen werden.

Aus diesem Gesetze erkennt man, wie stark sich die luftförmigen Körper zusammendrücken lassen, und hierdurch unterscheiden sie sich außerordentlich von den tropfbaren Flüssigkeiten, deren Zusammendrückbarkeit in sehr enge Grenzen eingeschlossen ist.

Wäre das Mariotte'sche Gesetz in aller Strenge giltig, soweit man auch den Druck steigern wollte, so würde daraus folgen, daß alle Gase einen gleichen Grad von Zusammendrückbarkeit besitzen, und daß diese Eigenschaft mit steigendem Drucke zunimmt. Für die atmosphärische Luft haben Dulong und Arago das Gesetz bis zu einem Drucke von 27 Atmosphären bestätigt; später haben aber Despretz und Regnault nachgewiesen, daß es jenseits dieser Grenze nicht mehr in aller Strenge richtig ist, und daß die Zusammendrückbarkeit der verschiedenen Gase nicht genau denselben Werth besitzt. Ist der Druck sehr groß, so wird atmosphärische Luft, Sauerstoffgas, Stickstoffgas und Kohlensäure stärker zusammengedrückt, als man nach dem Mariotte'schen Gesetze erwarten sollte, und nur für Wasserstoffgas ist eine solche Steigerung der Zu-

Digitized by Google

sammendrückbarkeit nicht beobachtet worden. Im Allgemeinen hat man gefunden, daß die Zusammendrückbarkeit einer Luftart zunimmt, sobald sich dieselbe dem Punkte nähert, wo sie in den tropfbar flüssigen Zustand übergeht.

Die Anwendung der Barometerprobe bei den Luftpumpen beruht auf diesem Gesetze; und auch bei Dampfkesseln oder ähnlichen Apparaten, in denen sich irgend eine Luftart in hoher Spannung befindet, mißt man den Druck der Luft dadurch, daß man beobachtet, wie stark ein in einer Glasröhre gefangenes Quantum Luft zusammengepreßt wird. Die Instrumente, welche zu diesem Zwecke dienen, heißen Manometer.

Digitized by Google

Zweites Buch.

Der Schall.

Erstes Kapitel.

Entstehung und Ausbreitung des Schalles.

§ 1. Schallerscheinungen in der Natur.

Wenn jedes Geräusch verstummt, wenn jeder Schall erlischt und vollständiges Schweigen uns umfängt, dann beschleicht unsere Seele ein Gefühl, als wäre alle Bewegung, alles Leben erstorben und der Starrheit des Todes anheimgefallen. Wir sind zu sehr daran gewöhnt, daß irgend ein Schall unser Ohr trifft, und sei es auch nur das Geräusch, das wir selbst verursachen, als daß wir uns mit voller Klarheit eine Welt des Schweigens vorstellen könnten, einen Zustand der Lautlosigkeit, wie er z. B. wohl auf dem Monde herrschen mag, ja überall im Weltenraume, wo die Luft, dieser Träger des Schalles, fehlt.

Auf der Erde wenigstens vergeht wohl kaum ein Augenblick, in dem nicht irgend ein Geräusch unser Ohr trifft, wenn wir nur darauf achten: und selbst, wenn wir uns aus dem Lärm der Städte, der mit tausend Stimmen unser Ohr betäubt, hinausflüchten in die Einsamkeit des Waldes und Feldes oder auf die Höhe der Berge, so verstummen auch dort nicht alle Laute, sondern immer bemerken wir dieses oder jenes Geräusch, nur nicht mehr in solch buntem, sinnverwirrendem Durcheinander. Doch weiter, welch ein Unterschied zwischen der Ruhe auf den Gipfeln der höchsten Gebirge und in den Eisregionen in der Nähe der Pole, und dem dröhnenden Widerhall am Gestade des Oceans! Dort wird

Digitized by Google

das Schweigen nur bisweilen unterbrochen durch das dumpfe Rollen der Lawinen, durch das Krachen des Eises und durch das Brüllen der Windsbraut: selbst das Grollen des Donners, das in der Ebene so lange anhält, hat in jenen Regionen einen andern Charakter; statt des rollenden Geräusches, das die Entladungen des Blitzes begleitet, und das sich an den verschiedenen Wolken- und Luftschichten bricht und von ihnen zurückgeworfen wird, hört man dort nur einen kurzen, trockenen Schlag, ähnlich dem Knall einer Feuerwaffe. Wie anders an der Küste des Meeres: hier betäubt das unaufhörliche Branden der Wogen, ihr Zerschellen an den Felsenklippen unser Ohr und bildet den Grundbaß für die helleren Töne, welche die Wellen erregen, indem sie über den Sand des Strandes dahinrollen und die Kiesel wälzen und gegen einander schlagen. Dort Todesschweigen, das nur zu Zeiten von dröhnenden Schlägen der Zerstörung unterbrochen ist: hier eine immerwährende Unruhe, ein Drängen und Treiben, das ohne Aufhören, und deshalb um so sicherer an der Zertrümmerung des festen Landes arbeitet.

Begeben wir uns dagegen in Wald und Feld, so treffen auch hier tausend verschiedene Laute unser Ohr, aber trotz ihrer Mannigfaltigkeit gewähren sie ihm eine viel vollkommenere Befriedigung. Bald rauscht das Laub im Winde, bald summen die Insecten in der Luft; hier huscht ein Vogel durch die Zweige und läßt seine Stimme weithin schallen, dort murmelt ein Bach, rauscht ein Fluß, stürzt sich ein schäumender Wasserfall in die Tiefe. Ja selbst, wenn die elementaren Gewalten sich entfesseln, wenn der Sturm die Bäume niederbeugt, die Aeste knickt, so ist dies zwar eine Musik von überwältigender Erhabenheit, aber dennoch hört unser Ohr in ihr deutlicher den Hauch des Geistes, als im einförmigen Rollen des Meeres oder im wüsten Lärm der Städte.

Aber die lautesten und anhaltendsten Geräusche der Natur entstehen und verbreiten sich in der Atmosphäre selbst, wenn die Luftmassen in heftige Bewegung gerathen sind und nun einander stoßen und drängen und sich an einander reiben, oder auch auf ihrem Wege auf feste Körper stoßen und sich zwischen ihnen hindurchdrängen. Kommt hierzu noch die elektrische Entladung des Blitzes, so übersteigt der Schall jedes andere Geräusch, das in der Atmosphäre ohne Zuthun künstlicher Mittel erregt wird. Nur eine Gruppe von Erscheinungen ist von noch mächtigerem Getöse begleitet, das sind die Erdbeben und die Ausbrüche der Vulkane.

Digitized by Google

Vor der gewaltigen Katastrophe, welche am 4. Februar 1797 Riobamba zerstörte, wurde in den Städten Quito und Ibarra ein ungeheures Getöse gehört, von dem man jedoch merkwürdiger Weise in Tacunga und Hambato, die der Unglücksstätte viel näher liegen, nichts wahrgenommen hatte; und die Erhebung des Vulkans Jorullo, der am 28. September 1759 mitten aus der Ebene aufstieg, kündigte sich schon zwei Monate lang vorher durch unterirdisches Rollen an*).

Um die Reihe der Geräusche, welche die Natur uns ohne Mithülfe der lebenden Wesen darbietet, zu vervollständigen, wollen wir nur noch die Detonationen erwähnen, welche den Fall der kosmischen Meteore, der Feuerkugeln und Meteorsteine begleiten: Diese Explosionen sind weithin hörbar, schon wenn sie in sehr großer Höhe erfolgen, und ihr Geräusch wird von denen, welche Zeugen jener merkwürdigen Naturerscheinungen gewesen sind, bald mit der Entladung von Kanonen, bald mit dem anhaltenden Rollen des Donners verglichen.

Doch unter allen Schallerscheinungen interessiren uns diejenigen am meisten, welche der Mensch und die Thiere mittels besonderer Organe hervorbringen: die menschliche Stimme, dieser unentbehrliche Dolmetscher unserer Gedanken und Gefühle, und das Geschrei der Thiere, das in gröberer Weise ihren Empfindungen Ausdruck giebt, durch welches sie ihre Wünsche, ihr Wohlbefinden, ihren Zorn, ihre Angst und Schmerzen bemerklich machen. Und weiter hat der Mensch eine Kunst erfunden, durch welche es ihm möglich ist, die innersten und innigsten Schwingungen seines Seelenlebens zu offenbaren, für welche das einfache, schlichte Wort nicht ausreicht, eine Kunst, die mehr als alle andern im Stande ist, unsere ganze Seele gefangen zu nehmen, die Musik: und dieser Kunst dienen eine Zahl von Instrumenten, deren Einrichtung uns hier beschäftigen soll, unter denen aber auch wieder die Stimme des Menschen den unbestritten ersten Platz einnimmt.

Auch der Fleiß, die gewerbliche Thätigkeit des Menschen, bringt eine Reihe von Geräuschen hervor, die sich meistens nicht durch besonderen Wohlklang auszeichnen, welche aber bei den Arbeiten der Industrie nicht vermieden werden können, sondern für viele Beschäftigungen ganz charakteristische Merkmale sind. Das Klappern der Mühlen und Webstühle,

*) S. Humboldt, Kosmos. Bd. I., p. 214. — Bd. IV., p. 334. Ausgabe von 1845—58.

Digitized by Google

das Schwirren der Räder, das Hämmern und Pochen auf Bauplätzen und in den Schmieden, das Pfeifen und Zischen der Sägen, Feilen und Hobel, das Stampfen der Dampfmaschinen, das manchmal Tag und Nacht nicht unterbrochen wird, sind Klänge, die unserem Ohr kein großes Wohlgefallen bereiten können: allein wer hört nicht lieber diese Musik, als das Knattern der Gewehrsalven, als das Krachen der Geschütze auf dem Felde, wo der Kampf der rohen Gewalt ausgefochten wird, an Stelle des friedlichen Wettstreites auf dem Gebiete des Gewerbes, der Kunst und der Wissenschaft?

So verschiedenartig nun auch die Schallerscheinungen sein mögen, die wir im Vorstehenden aufgezählt haben, so lassen sie sich doch alle durch eine besondere Art von Bewegung erklären, deren Natur und Gesetze wir jetzt aufsuchen müssen: wir wollen daher zuerst fragen, in welchen verschiedenen Weisen der Schall in festen, flüssigen und luftförmigen Körpern entstehen und sich ausbreiten kann.

§ 2. Verschiedene Arten der Schallerregung.

Treffen zwei Körper auf einander, so wird durch den Stoß, den sie einander ertheilen, in der Regel ein Schall erregt: so hören wir das Auftreffen des Hammers auf den Amboß, des Klöppels auf die Glocke; das Aneinanderschlagen der Becken, und auch das Geräusch der Trommel, der Klapper, und noch viele andere Schallerscheinungen werden durch den Stoß fester Körper erzeugt. Ist eine Wassermasse in eine Glasröhre eingeschlossen, die nicht vollständig von ihr erfüllt ist, sondern über dem Wasser einen luftleeren Raum enthält, so hört man deutlich das Aufschlagen des Wassers auf das Ende der Röhre, wenn man dieses Instrument, das Wasserhammer heißt, umkehrt, und ebenso hört man einen deutlichen Schlag, wenn beim Neigen eines Barometers das Queckſilber an die Kuppe der Röhre stößt. Die Art der Geräusche, welche in solcher Weise entstehen, hängt sowohl von der Beschaffenheit und Gestalt des erklingenden Körpers, als auch davon ab, wie sich der Schall weiter verbreitet, ehe er unser Ohr erreicht.

An zweiter Stelle wollen wir als Mittel der Schallerregung die Reibung nennen: sie ist es, welche gespannte Saiten oder auch Glocken und Scheiben aus Glas oder Metall zum Tönen bringt, wenn man

Digitized by Google

dieſelben mit einem Bogen, der mit Pferdehaaren beſpannt iſt, ſtreicht. Hierbei werden die Haare des Bogens mit einem Harze, dem Kolophonium oder Geigenharze, beſtrichen, um die Reibung zu vergrößern. Gewöhnlich läßt man die genannten Körper ſo ſchwingen, daß ſich ihre Theilchen in einer Richtung bewegen, welche zur Längenausdehnung der Saiten oder auf der Fläche der Scheiben und Glocken ſenkrecht iſt, und bezeichnet dann die Bewegungen, die ſie ausführen, als Transverſalſchwingungen: doch iſt es auch möglich, jene Körper durch Reiben in der Längsrichtung oder in einer in die Fläche fallenden Richtung in Schwingungen zu verſetzen, und hierdurch entſtehen die ſogenannten Longitudinalſchwingungen. Eine geſpannte Saite oder einen Stab in ſolche Longitudinalſchwingungen zu verſetzen, gelingt ſehr leicht; doch auch, wenn man den Rand eines geſchliffenen Weinglaſes reibt, indem man den Finger an demſelben immer im Kreiſe herum bewegt, geräth das Glas in Schwingungen, bei denen ſich die Theilchen nicht in einer Richtung bewegen, die auf der Fläche des Glaſes ſenkrecht ſteht, ſondern in die Fläche ſelbſt fällt. In den erwähnten Fällen hat der entſtehende Schall eine gewiſſe Regelmäßigkeit und gewährt unſerem Ohre eine größere oder geringere Befriedigung: wir nennen ihn einen Ton; doch auch ſehr unregelmäßige und unangenehme Geräuſche können durch Reibung entſtehen, ſo wenn ein Stuhl gerückt, mit einem Schieferſtifte auf eine Tafel geſchrieben, die Bremſe am Wagen angezogen wird, u. ſ. w. Fährt ein Wagen auf dem Pflaſter, ſo entſteht ein Geräuſch, theils durch Reibung, theils durch die Stöße der Räder gegen die Steine. Ebenſo wirken beide Urſachen, Stoß und Reibung, bei denjenigen Inſtrumenten, deren Saiten mit dem Finger oder einem beſonderen Inſtrumente, dem Plektrum der Alten, geriſſen werden, als der Lyra, Harfe, Zither und Guitarre: beim Clavier dagegen wirkt der Hammer nur durch einen Stoß auf die Saite.

Auch wenn feſte und flüſſige Körper auf einander treffen, geben ſie durch Stoß oder Reibung einen Ton: ebenſo, wenn nur Flüſſigkeiten auf einander ſtoßen oder ſich an einander reiben, wie beim Plätſchern des Regens auf einer Waſſerfläche, beim Murmeln des Baches, beim Brauſen der Wogen.

Endlich erregen die luftförmigen Körper Töne, wenn ſie ſich abwechſelnd verdichten und wieder ausdehnen, wie wir bald ausführlicher

Digitized by Google

besprechen werden; und auch diese Bewegungen werden durch Stoß oder Reibung bewirkt. Durchschneidet man mit einer Gerte oder Peitsche schnell die Luft, so hört man ein Pfeifen oder einen Knall; und auch die bewegte Luft, der Wind, bringt mächtige Geräusche hervor, wenn er sich in den Wipfeln der Bäume, oder zwischen den Gebäuden bricht, und auch selbst dann, wenn hoch oben in der Atmosphäre die Luftmassen auf einander stoßen. Heult der Sturm in den Schornsteinen, so gehen Schwingungsbewegungen besonderer Art vor sich, auf die wir zu sprechen kommen, wenn wir die Schwingung der Gase in Röhren, also mit anderen Worten die Vorgänge bei den Blasinstrumenten, zu denen auch die Stimme des Menschen und der höheren Thiere gehört, behandeln werden. Der Knall bei den Explosionen, das Geräusch bei electrischen Entladungen, der Donner, der den Blitzschlag begleitet, und ähnliche Schallerscheinungen werden durch die plötzlichen Volumenänderungen, durch Ausdehnung und Zusammenziehung der Gasmassen bewirkt.

Eine der merkwürdigsten Arten Schall zu erregen besteht wohl darin, daß man Metalle von verschiedener Temperatur mit einander in Berührung bringt, eine Erscheinung, die der Inspector einer sächsischen Silberschmelze, Namens Schwartz, bereits im Jahre 1805 zuerst wahrgenommen hat. Als derselbe einst einen noch heißen Silberbarren auf einen kalten Amboß legte, war er überrascht, plötzlich einen Ton zu hören, der auch so lange anhielt, bis der Barren sich bis zu einer ziemlich niedrigen Temperatur abgekühlt hatte. Dieselbe Beobachtung machte ebenso zufällig im Jahre 1829 Arthur Trevelyan, als er einen heißen Löthkolben auf einen Bleiblock legte; er aber construirte ein Instrument, durch welches diese Vorgänge in klareres Licht gestellt werden, und das wir später ausführlicher besprechen (vgl. Fig. 105).

Weiter wollen wir eine Erscheinung erwähnen, bei welcher ein Geräusch durch einen magnetischen Vorgang erregt wird: hängt man einen Eisenstab so auf, daß sein unteres Ende in eine Inductionsrolle hineinreicht, so hört man in demselben ein deutliches Knistern in dem Augenblicke, in welchem der electrische Strom in die Rolle eintritt; das Auftreten des Magnetismus hat sich also durch dieses Geräusch bemerklich gemacht. Endlich entstehen wohllautende Töne, wenn Gase im Innern von Röhren verbrennen. Läßt man ein brennendes Gas, am besten Wasserstoffgas aus einer langen Röhre ausströmen, und bringt man

Digitized by Google

die Flamme in ein weiteres Rohr, das beiderseits offen ist, so wird ein Ton gehört, dessen Höhe von der Weite und Länge, sowie auch von dem Materiale der Röhre abhängt: stellt man mehrere solche Apparate neben einander auf, deren Töne mit einander musikalisch verwandt sind, so bilden dieselbe eine chemische Harmonika. Das Studium dieser Verhältnisse hat Schaffgotsch und Tyndall zur Entdeckung der sogenannten singenden Flammen geführt: langbrennende Gasflammen, die bei gewissen Geräuschen in ein lebhaftes, regelmäßiges, ja vollständig rythmisches Flackern gerathen.

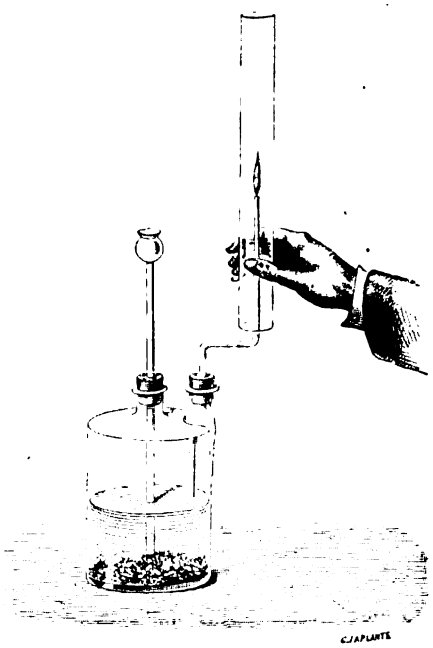


Fig. 91. Chemische Harmonika.

Bis hierher haben wir besprochen, wie in den tönenden Körpern Schall erregt werden kann: es entsteht nun die weitere Frage, wie sich dieser Schall weiter verbreitet, bis er in unser Ohr gelangt. Die Antwort auf diese Frage erhalten wir durch mehrere Beobachtungen und Versuche, die uns verständlich werden können, auch ohne daß es nöthig ist, uns über die Natur des Schalles selbst Rechenschaft zu geben.

§ 3. Ausbreitung des Schalles in festen, flüssigen und luftförmigen Körpern.

Daß der Schall eine merkliche Zeit gebraucht, um vom tönenden Körper bis zu unserem Gehörwerkzeuge zu gelangen, ist eine allgemein bekannte Thatsache: bemerken wir in einiger Entfernung Jemand, der z. B. mit einem Hammer gegen Steine klopft, so sieht unser Auge den Hammer niederfallen, bevor unser Ohr den Schlag vernimmt. Ganz dieselbe Erscheinung läßt sich wahrnehmen, wenn wir das Abschießen einer

Digitized by Google

Flinte oder Kanone, oder auch das Pfeifen einer Locomotive aus der Ferne beobachten: wir hören den Knall oder schrillen Pfiff erst eine gewisse Zeit später, als wir den Blitz oder weißen Dampf gesehen haben, und diese Zwischenzeit ist um so größer, je weiter entfernt unser Standpunkt ist.

Das Zeitintervall, welches wir in allen diesen Fällen beobachten, ist streng genommen nur der Unterschied zwischen der Zeit, welche der Schall, und der Zeit, welche das Licht gebraucht, um den Raum vom leuchtenden und tönenden Körper bis zu unserem Ohre zu durchlaufen; allein da die Geschwindigkeit, mit der sich das Licht ausbreitet, wie wir sehen werden, fast eine Million mal so groß ist, als die des Schalles, so darf man die Zeit, die das Licht gebraucht, vollständig vernachlässigen, und das beobachtete Intervall selbst als die Zeit nehmen, in welcher der Schall den Weg durchläuft.

Wie groß nun diese Geschwindigkeit ist, welche durch genaue Versuche gefunden wurde, werden wir im nächsten Paragraphen besprechen: jetzt aber wollen wir fragen, durch welche Stoffe sich der Schall verbreitet, und ob überhaupt zu seiner Ausbreitung irgend ein Stoff nothwendig ist.

Fig. 92. Der Schall breitet sich im luftleeren Raume nicht aus.

Zur Beantwortung der letzteren Frage stelle man ein Uhrwerk mit Wecker, der durch einen Hebel ausgelöst werden kann, unter den Recipienten einer Luftpumpe (Fig. 92). Solange der Recipient mit Luft erfüllt ist, hört man deutlich das Geräusch des Werkes: sobald man aber anfängt die Luft zu verdünnen, so wird der Schall allmählich schwächer und schwächer, und endlich, bei starker Verdünnung, sieht man wohl den Hammer gegen die Glocke schlagen, hört aber nichts mehr vom Schlage. Hierbei ist nur erforderlich, daß man das Uhrwerk auf eine dicke Unterlage von Kork, Filz, Watte oder einer anderen weichen, nicht elastischen Substanz gestellt hat. Läßt man nun wieder Luft oder irgend eine andere Gasart, wie Wasserstoff, Sauerstoff, Kohlensäure, Aetherdampf u. s. w. einströmen, so wird der

Digitized by Google

Schall wieder um so stärker, je größer die Menge des Gases ist, die wieder eindringt. Befinden wir uns dagegen in verdichteter Luft, so werden die Schallempfindungen unserem Ohre um so empfindlicher, wie alle die bestätigen, die einmal in einer Taucherglocke auf den Grund des Meeres hinabgestiegen sind.

Also die Luft und die Gase sind Träger des Schalles, wenn auch nicht alle von gleicher Güte. So hat z. B. Tyndall gezeigt, daß bei gleichem Luftdruck das Wasserstoffgas den Schall schlechter leitet, als die atmosphärische Luft, trotzdem daß die Ausbreitungsgeschwindigkeit desselben in jenem viermal so groß ist, als in dieser.

Auch feste Körper vermitteln die Ausbreitung des Schalles, wenngleich in sehr verschiedenem Grade. Nähert man bei dem vorigen Versuche das Ohr dem Teller der Luftpumpe, so hört man das Geräusch des Weckers, wenn auch sehr schwach: dasselbe ist also durch das Kissen und den Teller weiter verbreitet worden. Entfernt man das Kissen und stellt man den Wecker unmittelbar auf den Teller, so bleibt sein Geräusch trotz alles Auspumpens hörbar, es wird durch die Masse des Tellers selbst weiter getragen.

Das Wasser, wie alle Flüssigkeiten sind ebenfalls Träger des Schalles, und zwar pflanzt sich in ihnen der Schall mit noch größerer Geschwindigkeit und Intensität fort, als in der Luft. Taucht man unter, so hört man unter dem Wasser das geringste Geräusch, z. B. das Aneinanderschlagen kleiner Kiesel, viel besser, als in der Luft.

Daß sich der Schall durch feste Körper, und zwar besser als durch die Luft, ausbreitet, kann man leicht durch einige einfache Versuche beweisen. Legt man das Ohr an das Ende eines langen Balken, so hört man deutlich, wenn am anderen Ende mit einer Stecknadel oder Feder gekritzelt wird; stellt man sich dagegen seitwärts, etwa neben die Mitte des Balkens, so hört man nichts von jenem Geräusche. Ebenso hört man das Ticken einer Uhr, die an einer langen eisernen Röhre hängt, deutlich, wenn man das Ohr fest an das andere Ende der Röhre legt, während man in viel geringerer Entfernung durch die Luft schon nichts mehr davon wahrnimmt. Um diese Verhältnisse genauer zu untersuchen, begab sich Hassenfratz, wie Haüy berichtet, in die Steinbrüche unterhalb Paris und ließ einen Begleiter mit einem Hammer gegen die Steinwand eines unterirdischen Ganges klopfen. Er selbst entfernte sich

Digitized by Google

allmählich immer weiter von der Stelle, wo geklopft wurde; indem er nun an verschiedenen Punkten das eine Ohr an die Wand anlegte, kam er bald in eine Entfernung, wo er deutlich jeden Schlag doppelt hörte, das eine Mal durch die Wand, das andere Mal durch die Luft, und zwar gelangte der Schall durch den Stein viel schneller an sein Ohr, als durch die Luft. Allein, während die Geschwindigkeit im Steine viel größer war, nahm gleichzeitig die Intensität verhältnißmäßig viel schneller ab, sodaß der Schlag durch den Stein schon in der Entfernung von 134 Schritt erlosch, während er durch die Luft noch im Abstande von 400 Schritt gehört wurde. Aehnliche Versuche mit Balken und Metallstangen sind wiederholt ausgeführt worden und haben zu entsprechenden Resultaten geführt.

Auch die feste Erdrinde ist im Stande, Geräusche weiter zu verbreiten, und nicht ohne Grund legt der Indianer Amerika's sein Ohr auf den Boden, um die Bewegungen seines noch entfernten Feindes auszukundschaften. Besonders weit hin verbreitet sich aber durch die Erdoberfläche der Schall gewaltiger Explosionen, des Kanonendonners in der Schlacht, der Erdbeben und Ausbrüche der Vulkane. So schreibt Humboldt*): „In Caracas, in den Grasfluren von Calabozo und an den Ufern des Rio Apure, welcher in den Orinoco fällt, in einer Landstrecke von 2300 Quadratmeilen, hörte man überall am 30. April 1812, ohne alles Erdbeben, ein ungeheures donnerartiges Getöse, als 158 Meilen davon, im Nordosten, der Vulkan von St. Vincent in den kleinen Antillen aus seinem Krater einen mächtigen Lavastrom ergoß. Es war also der Entfernung nach, als wenn man einen Ausbruch des Vesuvs im nördlichen Frankreich vernähme. Im Jahre 1744, bei dem großen Ausbruch des Vulkans Cotopaxi, hörte man in Honda am Magdalenen-Strome unterirdischen Kanonendonner. Der Krater des Cotopaxi liegt aber nicht blos 17000 Fuß höher als Honda; beide Punkte sind auch durch die colossalen Gebirgsmassen von Quito, Pasto und Popayan, wie durch zahllose Thäler und Klüfte, in 109 Meilen Entfernung getrennt. Der Schall ward bestimmt nicht durch die Luft, sondern durch die Erde aus großer Tiefe fortgepflanzt. Bei dem heftigen Erdbeben von Neu-Granada (Februar 1835) hörte

*) Kosmos, Bd. I. S. 215, vergl. mit Bd. IV. S. 226 und Ansichten der Natur, II. Bd. S. 264.

Digitized by Google

man unterirdischen Donner gleichzeitig in Popayan, Bogota, Santa Marta und Caracas (hier 7 Stunden lang ohne alle Erschütterung), in Haiti, Jamaica und um den See von Nicaragua."

Wir haben gesehen, daß der Schall zu seiner Ausbreitung eines Stoffes bedarf, durch den er weiter getragen wird, und daß sich dazu sowohl feste, als flüssige, als luftförmige Substanzen eignen: der gewöhnlichste Träger des Schalles aber ist die Luft. Hieraus folgt, daß das Bereich des Schalles auf die Grenzen der Atmosphäre beschränkt ist: der heftigste Ausbruch eines Vulkans würde nicht von einem etwaigen Bewohner des Mondes gehört werden, und ebenso könnten wir die gewaltigste Katastrophe, die einen Himmelskörper betreffen kann, z. B. ein vollständiges Bersten desselben, möglicherweise sehen, niemals aber würde ein Schall unser Ohr treffen. Wenn wir daher das Platzen der Meteorsteine hören, so ist dies ein Beweis, daß sich dieselben bereits in unserer Atmosphäre befinden, und hierdurch erhalten wir vielleicht einmal ein Mittel, die Höhe des Luftmeeres, das uns umgiebt, annähernd zu bestimmen. Schon auf hohen Bergen, wo die Luft viel dünner ist, als in den Ebenen, nimmt die Intensität des Schalles bedeutend ab, und bereits Sauſſure bemerkt, daß auf dem Gipfel des Mont Blanc ein Pistolenschuß nicht lauter klingt, als im Tieflande die Explosion eines kleinen Feuerwerkskörper, den man mit dem Namen eines Frosches bezeichnet. In derselben Höhe hat Martins ein Gewitter beobachtet und gefunden, daß dort der Donner nicht rollt, sondern nur aus einem kurzen, trockenen Schlage, gleich dem Knalle eines Feuergewehres, besteht. Endlich bemerkt Gay-Lussac, daß der Ton seiner eigenen Stimme in der Höhe von 7000 m, bis zu welcher er im Luftballon aufgestiegen war, trotz aller Anstrengung der Lungen zu einem Lispeln herabsank.

§ 4. Geschwindigkeit des Schalles in der Luft und anderen Mitteln.

Wir haben schon erwähnt, daß zur Ausbreitung des Schalles eine gewisse Zeit erforderlich ist: jetzt wollen wir die Mittel kennen lernen, um seine Geschwindigkeit zunächst in der Luft kennen zu lernen. Die Lösung dieser Aufgabe hatte bereits Galilei beschäftigt, und auch Newton, Boyle, Mersenne und Flamsteed hatten schon, theils durch Versuche,

Digitized by Google

theils auf theoretischem Wege, Werthe gefunden, die aber noch nicht eine sehr große Genauigkeit besaßen. Erst im Jahre 1822 vereinigten sich eine Anzahl Gelehrte, um durch Versuche in größerem Maßstabe einen möglichst endgültigen Werth zu bestimmen. Die Methode, welche sie anwendeten, war bereits im Jahre 1738 von einer Commission der Akademie der Wissenschaften, wenn auch nicht mit vollständigem Erfolge zur Ausführung gebracht worden, aber erst im Jahre 1822 führte sie in folgender Weise zu genügenden Resultaten.

Fig. 93. Bestimmung der Geschwindigkeit des Schalles in der Luft, zwischen Montlhéry und Villejuif, 1822.

Zunächst theilten sich die Theilnehmer an den Versuchen in zwei Gruppen: Gay-Lussac, Humboldt und Bouvard begaben sich nach Montlhéry; Prony, Arago und Matthieu nach Villejuif, welche beiden Punkte man gewählt hatte, weil die Aussicht zwischen denselben durch keinen Gegenstand unterbrochen war. An jeder Station befanden sich zwei Chronometer von vorzüglicher Güte, und Geschützstücke von gleichem Caliber, aus denen mit genau gleichen Pulverladungen abwechselnd in Zwischenräumen von zehn Minuten je zwölf Schüsse abgefeuert wurden.

Digitized by Google

Die Versuche begannen um 11 Uhr Nachts bei ziemlich ruhiger Luft und einer Temperatur von 16°. Bei jedem Schusse beobachtete man nun auf der andern Station die Zeit, die zwischen dem Erscheinen des Lichtblitzes und des Knalles verfloß, und erhielt für dieselbe aus allen Beobachtungen einen Mittelwerth von 54,6 Secunden. Da nun der Abstand der beiden Kanonen nach sorgfältigen Messungen 18613,5 m betrug, so folgt hieraus die Geschwindigkeit des Schalles gleich 340,9 m in der Secunde. Dieser Werth gilt aber nur für die Temperatur, die während der Beobachtungen herrschte; denn man hat durch anderweitige Versuche gefunden, daß sich der Schall um so schneller ausbreitet, je höher die Temperatur ist: will man daher die Schallgeschwindigkeit bei der Temperatur des schmelzenden Eises oder 0° erfahren, so muß der Werth etwas kleiner ausfallen als der oben angegebene. Daß man die Beobachtungen gegenseitig anstellte, damit bezweckte man, sich von dem Einflusse des Windes unabhängig zu machen, denn jede Luftströmung beschleunigt auch die Ausbreitung des Schalles in der Richtung ihres Laufes, verzögert sie aber in entgegengesetzter Richtung.

Außer dem erwähnten sind noch als besonders sorgfältige Versuche, wenn auch in kleinerem Maßstabe angestellt, durch Benzenberg 1811, Goldingham 1821, Moll und Van Beck, Stampfer und Myrbach 1822, Bravais und Martins 1844. Das Mittel aus allen giebt für 0° und vollständig trockne Luft eine Schallgeschwindigkeit von 332 m, ein Werth, der etwas größer ist, als der, den man erhält, wenn man den oben angeführten Werth auf 0° reducirt.

Doch nicht nur die Temperatur, auch der Feuchtigkeitsgrad der Luft übt einen nicht geringen Einfluß auf die Geschwindigkeit des Schalles aus: daher sind auch alle Beobachtungen, die in freier Luft ausgeführt werden, mit Fehlern behaftet, welche sich nicht verbessern lassen, da man niemals die Beschaffenheit der Schichten, durch die Schall hindurchgeht, bestimmen kann. Um sich nun von diesen Einflüssen unabhängig zu machen, hat Le Roux die Geschwindigkeit in einer Röhre von 72 m Länge gemessen, welche er mit vollkommen trockner Luft füllte und durch angelegtes Eis immer auf der Temperatur von 0° erhielt. Beide Enden der Röhre waren durch straff gespannte Membranen aus Kautschuck abgeschlossen. Die Erschütterung der Luft wurde durch einen einzigen Schlag mit einem hölzernen Hammer gegen die eine Membran hervor-

Digitized by Google

gerufen, und sowohl der Augenblick, wo sie erfolgte, als auch der Augenblick, wo die zweite Membran durch die ankommende Welle in Schwingung versetzt wurde, durch einen electromagnetischen Registrirapparat, der mit den Membranen in Verbindung stand, auf einer sich gleichmäßig drehenden Rolle verzeichnet. Durch eine Reihe sorgfältig ausgeführter Versuche bestimmte Le Roux auf diese Weise die Schallgeschwindigkeit zu $330{,}66^{m}$.

Später hat Regnault eine Reihe von Versuchen über die Ausbreitung des Schalles in cylindrischen Röhren und in der freien Luft veröffentlicht, aus denen sich ergiebt, daß sowohl die Intensität, als auch die Geschwindigkeit des Schalles in Röhren abnimmt, je größer der Weg ist, den derselbe bereits durchlaufen hat: und zwar erfolgt diese Abnahme um so schneller, je kleiner der Durchmesser der Röhre ist; auch die Beschaffenheit der Wand ist hierbei von großem Einflusse. Der Grund für diese Abnahme, welche mit den aus der Theorie entwickelten Formen im Widerspruche steht, mag wohl darin zu suchen sein, daß die Gase nicht, wie man angenommen hatte, eine vollkommene Elasticität besitzen. Durch dieselben Versuche bewies Regnault zugleich einen Satz, der aus theoretischen Gründen bereits früher gefolgert worden war, daß nämlich die Geschwindigkeit, mit der sich der Schall in ein und derselben Gasart fortpflanzt, von dem Drucke, dem es unterworfen ist, nicht abhängt, daß sie sich aber für verschiedene Gase, je nach der Dichtigkeit derselben, ändert.

Auch bei Bestimmung der Geschwindigkeit, mit der sich der Schall in freier Luft ausbreitet, fand er, daß dieselbe in einem Abstande von 1280^{m} von dem Gewehre, dessen Knall zu den Beobachtungen benutzt wurde, $331{,}37^{m}$, bei einem Abstande von 2445^{m} aber nur noch $330{,}7^{m}$ betrug: er vermuthet, daß dieser Unterschied dadurch zu erklären sei, daß die Luftschichten in der Nähe der Mündung des Gewehres durch die Explosion selbst einen Stoß erhalten, der die Geschwindigkeit des Schalles vergrößert.

Hohe und tiefe, schwache und starke Töne pflanzen sich in der Luft mit gleicher Geschwindigkeit fort, wie man daraus sieht, daß ein Musikstück für unser Ohr denselben Charakter behält, sowohl was den Rhythmus und die Reinheit der Accorde, als auch was die Nüancen des Vortrages anlangt, mögen wir dasselbe in der Nähe oder in großer Entfernung anhören. Je mehr wir uns entfernen, desto mehr nehmen alle Töne,

Digitized by Google

ziemlich in gleichem Verhältnisse an Stärke ab, und dies ist die einzige Veränderung, welche wir wahrnehmen. Wäre die Fortpflanzungsgeschwindigkeit für verschiedene Tonhöhen nicht dieselbe, dann müßte auch das bestausgeführte Musikstück in einiger Entfernung den Eindruck der größten Verwirrung machen. Endlich scheint sich der Schall auch in horizontaler, verticaler und schräger Richtung mit gleicher Geschwindigkeit auszubreiten; wenigstens haben Versuche, welche Martins und Bravais im Jahre 1844 am Faulhorn, und andere, welche Stampfer und Myrbach in verschiedenen Höhen über dem Meeresspiegel angestellt haben, keinen Unterschied ergeben.

Aus der Vergleichung der Geschwindigkeiten, mit der sich einerseits das Licht, andererseits der Schall fortpflanzt, und mit der Geschosse die Luft durchschneiden, ergeben sich merkwürdige Folgerungen: wird ein Soldat von einer Kanonenkugel getödtet, so kann er das Aufblitzen des Schusses sehen, den Knall aber nicht hören, weil die Geschwindigkeit der Kugel größer ist, als die des Schalles, es müßte denn die Entfernung sehr groß sein; denn in diesem Falle wird die Geschwindigkeit des Geschosses durch den Widerstand der Luft so stark verzögert, daß der Schall eher eintrifft. Denken wir uns ferner, daß an einem Orte, der sich infolge der Axendrehung der Erde mit der Geschwindigkeit von 331^{m} in der Secunde bewegt, zu Mittag eine Kanone abgefeuert wird, so erreicht der Schall alle genau westlich gelegenen Punkte in dem Augenblicke, wenn auch für sie der Mittag eintritt: durch das Signal wird also auch ihr Mittag markirt.

Im Wasser durchläuft der Schall in der Secunde einen Raum, der ungefähr 4^1_2 mal so groß ist, als der in der Luft zurückgelegte Weg, wie die schönen Versuche ergaben, welche Colladon und Sturm im Jahre 1827 im Genfer See ausführten. Die genannten Beobachter bestiegen Boote, von denen das eine bei Thonon vor Anker lag, während sich das andere am gegenüberliegenden Ufer befand, und gaben einander Zeichen durch eine Glocke, die unter Wasser mit einem Hammer angeschlagen wurde. Der Schall wurde an der gegenüberliegenden Station durch ein Hörrohr aufgefangen, dessen Schalltrichter sich ebenfalls unter Wasser befand und durch eine dünne Metallplatte geschlossen war, und der Beobachter an dieser Station war mit einem Uhrwerk versehen, durch welches sich die Zeitdauer, die der Schall im Wasser gebraucht, mit großer Schärfe bestimmen ließ. Damit nun dieser Beobachter genau

Digitized by Google

weiß, in welchem Augenblicke die Glocke angeschlagen wird, ist an einem Hebel, der sich mit dem Hammer gleichzeitig bewegt, eine brennende Lunte befestigt, die im Augenblicke des Anschlagens eine Quantität Pulver entzündet. Die ganze Einrichtung ist in Fig. 94 und 95 so deutlich dargestellt, daß wir nichts weiter hinzuzufügen haben. Die Entfernung der beiden Stationen betrug 13487^{m}, die Zeit, welche der Schall im Wasser zum Durchlaufen dieser Strecke bei einer Temperatur von 8^{0} gebrauchte, 9,4 Secunden, sodaß sich hieraus eine Geschwindigkeit von 1435^{m} in der Secunde ergiebt.

Fig. 94. Bestimmung der Geschwindigkeit des Schalles im Wasser.

Um die Geschwindigkeit des Schalles in festen Körpern zu bestimmen, benutzte schon Biot eine gußeiserne Röhre von 951^{m} und fand für dieselbe eine Fortpflanzungsgeschwindigkeit von 3250^{m}, also einen fast zehnmal so großen Werth, als für die Luft. Später hat man viele andere Körper der Prüfung unterzogen, und wir wollen hier die Werthe, die man für einige luftförmige, flüssige und feste Körper gefunden hat, mittheilen:

Digitized by Google

Schallgeschwindigkeit in Gasen bei 0°	Wasserstoff	1270 m
	Ammoniakgas	407
	Atmosphärische Luft	331
	Sauerstoff	317
	Kohlensäure	262

Schallgeschwindigkeit in Flüssigkeiten	Flußwasser bei 15°	1437 m
	Meerwasser bei 20°	1453
	Absoluter Alkohol bei 23°	1160
	Schwefeläther bei 0°	1159

Fig. 95. Versuche auf dem Genfer See von Colladon und Sturm.

Schallgeschwindigkeit in festen Körpern	Tannenholz	5994 m
	Glas	5438
	Stahl	5030
	Kupfer	3716
	Eichenholz	3440
	Platin	2701
	Silber	2684
	Zinn	2498

Digitized by Google

§ 5. Erscheinungen der Reflexion und der Brechung des Schalles.

Wir werden bald sehen, daß sich die Strahlen des Lichts und der Wärme zunächst in geraden Linien fortpflanzen: treffen sie aber auf die Oberfläche eines Körpers, so können sie unter gewissen Bedingungen nach bestimmten Gesetzen zurückgeworfen werden, oder auch in den Körper eindringen; dabei werden sie aber von ihrer Bahn in eine andere Richtung abgelenkt. Die erste Erscheinung, welche man Reflexion nennt, wie auch die zweite, die Brechung oder Refraction heißt, treten auch für den Schall ein, in welchem Falle jedoch die Richtung der Schallbewegung nicht so leicht beobachtet werden kann, als dies beim Lichte der Fall ist.

Daß der Schall zurückgeworfen wird, wenn er bei seiner Ausbreitung in der Luft auf ein festes Hinderniß trifft, ist eine allgemein bekannte Thatsache, auf welcher ja das Echo und andere ähnliche Erscheinungen beruhen. Spricht man in einem Zimmer von genügender Größe, dessen Wände nicht mit Gegenständen bedeckt sind, die den Schall ersticken, so nimmt man eine Verstärkung der eigenen Stimme wahr, und auch die Schritte und die Schläge gegen harte Gegenstände schallen daselbst mit weit größerer Intensität. In noch größeren Sälen werden die Worte gleichsam verdoppelt, und in Räumen, in denen der Schall auf verschieden vertheilte Hindernisse trifft und von ihnen zurückgeworfen wird, wie in manchen Kirchen, wird die Rede durch den Wiederhall geradezu verwirrt, und es ist schwierig, dann noch dem Redner zu folgen. Diese Verstärkung des Schalles, welche aber nicht allein durch einfache Reflexion, sondern zum Theil auch durch ein Mittönen oder Mitklingen, also durch ein wirkliches Schwingen der festen Theile der Wände bewirkt wird, heißt Resonanz.

Beträgt der Abstand des Beobachters von der Wand mehr als etwa 20^{m}, so hört derselbe jede Silbe, die er ausspricht doppelt, und wir sagen dann, es entsteht einfaches Echo; sind mehrere Wände vorhanden, die den Schall zurückwerfen; so entsteht in gleicher Weise ein mehrfaches Echo. Wir wollen jetzt sehen, wie diese Erscheinung zu erklären ist.

Wie kurz auch die Zeit sein möge, während welcher ein Schall an-

Digitized by Google

dauert, so wird die Empfindung, die er in unserem Ohre hervorruft, doch nicht in demselben Augenblicke verschwinden, in welchem der Schall erlöscht, sondern sie währt noch eine gewisse Zeit lang fort, die man etwa auf den neunten Theil einer Secunde schätzt. In derselben Zeit aber durchläuft der Schall einen Weg von ungefähr 37 m. Befinden wir uns daher einer Wand gegenüber in geringerer Entfernung, als 18 m, so wird der Schall einer von uns ausgesprochenen Silbe Zeit genug haben, um den Weg AO (Fig. 96) von unserem Munde bis zur Wand und zurück bis zu unserem Ohre zurückzulegen, bevor die Schallempfindung, welche direct durch das Sprechen erregt wurde, erloschen ist. Der wiederkehrende Schall mischt sich also mit dem directen Schall der gesprochenen Silbe und bewirkt nur eine Verlängerung der Zeit, während der wir sie hören, oder einen Nachhall, und eine Verstärkung, oder Resonanz. Ist der Nachhall in einem Raume sehr bedeutend, so wirkt er, besonders wenn mehrere Personen gleichzeitig sprechen, störend und verwirrend, und deshalb muß man auf ihn bei der Anlage von Kirchen, Concertsälen, Theatern u. s. w. die größte Rücksicht nehmen.

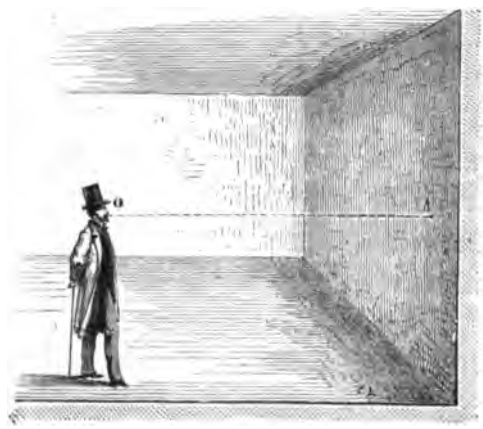


Fig. 96. Reflexion des Schalles. Resonanz.

Ist dagegen der Abstand AO größer als 18 m, so ist die Empfindung der ausgesprochenen Silbe in unserem Ohre erloschen, ehe noch der Wiederhall von der Wand zurückkehrt, wir hören dieselbe Silbe noch ein zweites Mal, wenn auch etwas schwächer, es entsteht ein einsilbiges Echo. Je größer die Entfernung ist, desto später trifft der Wiederhall ein, und desto mehr Silben sind in ihm zu unterscheiden, wir vernehmen dann ein mehrsilbiges Echo. Beträgt die Entfernung der Wand z. B. 180 m, und ist zum Aussprechen eines viersilbigen Wortes eine Secunde erforderlich, so werden wir alle vier Silben wieder hören, da der Schall etwas mehr als eine Secunde gebraucht, um den Weg bis zur Wand und wieder zurück zu durchlaufen.

Digitized by Google

Befinden sich in verschiedenen Abständen mehrere, theils parallele, theils gegen einander geneigte Wände, so wird uns der Schall von manchen in verschiedenen Zwischenräumen direct zurückgeworfen, andere dagegen reflectiren ihn so, daß er erst wieder auf eine neue Wand trifft, ehe er in unser Ohr zurückkehrt. Auf diese Weise entstehen die mehrfachen Echos, wie z. B. am Lurleifelsen, bei Adersbach im Riesengebirge, auf dem Königsplatze zu Kassel u. a. m. Von letzterem noch eine Merkwürdigkeit: als in der Mitte des genannten Platzes zur Zeit des Königreichs Westfalen eine Statue Napoleons errichtet wurde, störte diese den Schall so, daß das Echo verstummte und erst wieder hörbar wurde, als nach der Restauration das Standbild entfernt war. Das berühmteste mehrfache Echo aber befindet sich im italienischen Schlosse Simonetta, in dessen Hofe eine Silbe von den parallelen Flügeln des Gebäudes bis gegen vierzig Male wiederholt wird.

Noch manches merkwürdige Echo wird von älteren und neueren Schriftstellern erwähnt, und wir wollen hier aus der Zahl derselben einige weitere Beispiele herausgreifen. Der durch seinen Reichthum berühmte römische Feldherr Crassus ließ seiner verstorbenen Gemahlin Metella ein Grabmal von großartigen Dimensionen errichten, dessen Wände den Schall achtmal wiedergaben; ja ein ganzer Vers der Aeneide soll vollständig von ihnen wiederholt worden sein. Addison fand auf seiner Reise in Italien ein Echo, das einen Pistolenschuß fünfundsechzig Male wiederholte. In Verdun gab es zwischen zwei Thürmen, die 52 m von einander abstanden, ein Echo, welches dasselbe Wort zwölf bis dreizehn Mal wiedergab. Endlich wollen wir noch die weiten Höhlungen und schmalen Gänge im Innern der größten Pyramide erwähnen, in denen sich der Schall bis zu zehnmal wiederholt. „Die Schwingungen, sagt Jomard, welche von Wand zu Wand zurückgeworfen werden, durchlaufen alle diese Kanäle mit glatten Oberflächen, stoßen gegen alle Wände, und gelangen allmählich bis zum äußeren Eingange, wo sie, bedeutend geschwächt, dem Grollen des Donners bei einem abziehenden Gewitter gleichen. Im Innern wird das Geräusch Schritt für Schritt immer schwächer, und dieses allmähliche Verlöschen erregt die Aufmerksamkeit und das Interesse des Beobachters nicht weniger, als das Todesschweigen, das sonst in dieser Oede herrscht."

Die Reflexion des Schalles folgt sehr einfachen Gesetzen, welche,

Digitized by Google

wie wir später beim Lichte zeigen, sich aus den schwingenden Bewegungen, die den Schall bilden, erklären lassen; diese Gesetze lassen sich aber auch auf experimentellem Wege nachweisen, ohne daß wir irgend welche Hypothese über das Wesen des Schalles voraussetzen.

Jede gerade Linie, die von dem Punkte ausgeht, in dem der Schall seinen Ursprung hat, wollen wir einen *Strahl* nennen; trifft diese Linie auf die Oberfläche eines festen Körpers, so heißt sie bezüglich dieser Fläche ein *einfallender Strahl*. Der Schall, der nun in der Richtung des einfallenden Strahles die Fläche trifft, wird von dieser in einer neuen, bestimmten Linie zurückgeworfen, welche man als *reflectirten Strahl* bezeichnet. Endlich denken wir uns in dem Punkte, wo der Strahl die Fläche trifft, auf derselben eine Senkrechte, das *Einfallsloth*, errichtet, und nennen die Winkel, welche der einfallende und der reflectirte Strahl mit diesem Lothe bilden, bezüglich *Einfalls-* oder *Reflectionswinkel*. Mit Zugrundelegung dieser Definition läßt sich nun das Gesetz der Reflexion folgendermaßen aussprechen.

Der einfallende und der reflectirte Strahl liegen mit dem Einfallslothe in einer Ebene und bilden mit ihm nach entgegengesetzter Seite hin gleiche Winkel.

Um dieses Gesetz experimentell nachzuweisen, gebraucht man zwei *parabolische Hohlspiegel* aus Metall, d. h. Spiegel, deren Oberfläche man sich dadurch gebildet denken kann, daß sich eine Parabel um ihre Axe dreht. Wir haben schon früher, bei Gelegenheit der Morin'schen Fallmaschine S. 29 Fig. 12, einige Grundeigenschaften der Parabel erwähnt, hier wollen wir nur noch Folgendes neu hinzufügen. Treffen mehrere Strahlen, welche sich parallel zur Axe bewegen (Fig. 97), auf die Parabel, so werden sie alle so zurückgeworfen, daß sie durch einen und denselben Punkt F gehen, den man den *Brennpunkt* oder *Focus* der Parabel nennt: gehen umgekehrt vom Brennpunkte Strahlen FM aus, so werden dieselben in einer zur Axe parallelen Richtung MZ zurückgeworfen, weil sie in diesem Falle

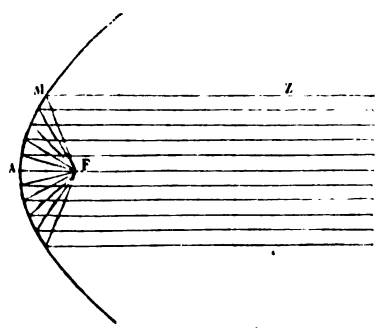


Fig. 97. Eigenschaften des Brennpunktes der Parabel.

Digitized by Google

aus mathematiſchen Gründen mit Linien, die im Einfallspunkte auf dem Umfange ſenkrecht errichtet ſind, gleiche Winkel bilden.

Stellt man nun zwei paraboliſche Spiegel einander ſo gegenüber, daß ihre Axen in eine Linie fallen (Fig. 98), und hängt man in den Brennpunkt des einen Spiegels eine Uhr, ſo werden die Strahlen des Schalles, der durch das Ticken der Uhr hervorgerufen wird, vom Spiegel

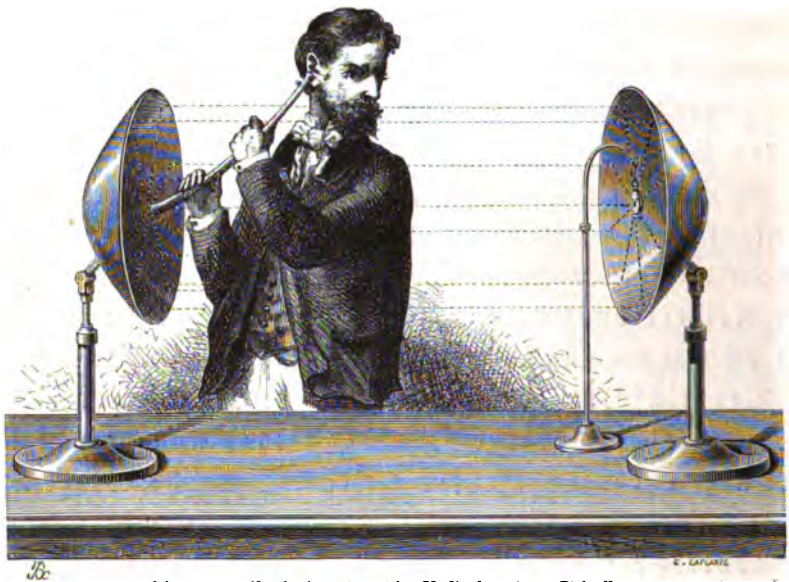


Fig. 98. Verſuche über die Reflexion des Schalles.

parallel zur Axe zurückgeworfen; mithin treffen ſie auch den zweiten Spiegel parallel ſeiner Axe und müſſen ſich in ſeinem Brennpunkte vereinigen. Hält man daher das Ende eines Höhrrohres in dieſen Punkt, während man das andere Ende am Ohre befeſtigt, ſo hört man hier das Ticken der Uhr ſehr deutlich, während man es an anderen Punkten, die der Uhr viel näher liegen, nicht vernimmt.

Eine ähnliche Eigenſchaft hat diejenige Linie, welche man in der Mathematik als Ellipſe bezeichnet, nur daß ſich in derſelben zwei Brennpunkte befinden, welche zu einander in ſolcher Wechſelbeziehung ſtehen, daß alle Strahlen, die von dem einen ausgehen, ſich im andern vereinigen. Die Reflexion in einer Ellipſe erfolgt alſo ebenſo, wie in zwei einander gegenüberſtehenden Paraheln. Iſt daher das Gewölbe eines Saales von elliptiſcher Form, ſo werden ſchwache Töne, die in dem einen Brennpunkte erregt werden, im andern deutlich gehört, während

Digitized by Google

sie in den zwischenliegenden Punkten nicht vernommen werden. Ein solcher Saal befindet sich im Alterthums-Cabinet des Louvre (Fig. 99): stehen in ihm zwei Personen genau in den Brennpunkten der Ellipse, so können sich dieselben flüsternd Mittheilungen machen, ohne daß eine zwischen ihnen stehende Person ein Wort versteht.

Wie wir schon erwähnten, bewegt sich der Schall nicht in allen Mitteln mit gleicher Geschwindigkeit: wenn er daher aus einem Mittel in ein anderes übergeht, so wird er in seiner Bewegung entweder beschleunigt oder verzögert, und dies macht sich dadurch bemerklich, daß, wenn der Strahl die Grenzfläche in schiefer Richtung durchschneidet, er

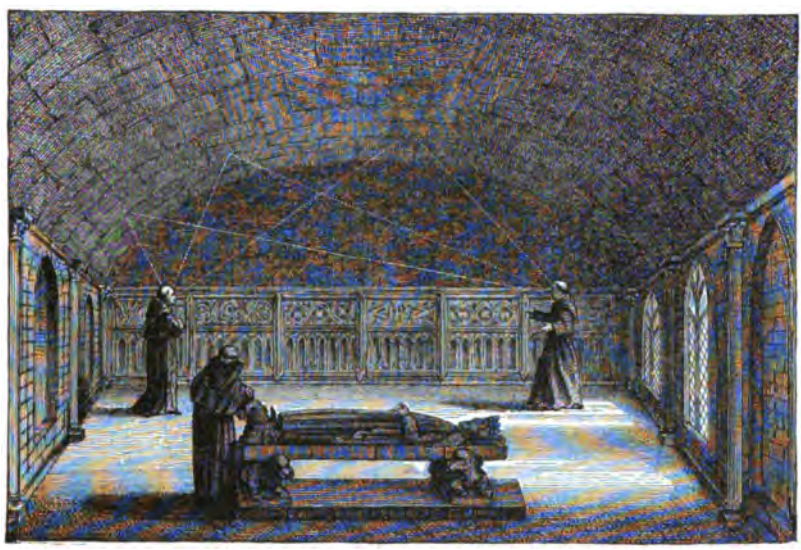


Fig. 99. Reflexion des Schalles in einem elliptischen Gewölbe.

sich im ersteren Falle mehr vom Einfallslothe abbiegt, im zweiten Falle aber demselben nähert. Ganz dieselben Erscheinungen lassen sich, und zwar viel leichter, auch für einen Lichtstrahl nachweisen; sie sind auch für letzteren viel früher beobachtet und mit dem Namen der Refraction oder Brechung der Lichtstrahlen bezeichnet worden. Auf die Gesetze der Refraction werden wir im dritten Buche, der Lehre vom Lichte, ausführlicher eingehen: jetzt wollen wir nur einen sehr merkwürdigen Versuch erwähnen, welcher beweist, daß auch für den Schall eine solche Strahlenbrechung existirt.

Der Physiker Sondhaus spannte zu beiden Seiten eines Metall-

Digitized by Google

ringes Häute aus Collodium aus und füllte den Zwischenraum zwischen beiden mit Kohlensäure, in welcher sich der Schall langsamer bewegt, sodaß der ganze Apparat die Form einer Linse annahm (Fig. 100). Findet nun wirklich eine Refraction oder Brechung des Schalles statt, so müssen Strahlen, die von der einen Seite auf die Linse treffen, auf der andern Seite in einen Punkt vereinigt werden, gerade wie die Lichtstrahlen durch eine Glaslinse. Brachte Sondhaus nun eine Taschenuhr in die Axe der Linse, so hörte er in einem bestimmten Punkte auf der andern Seite deutlich das Ticken der Uhr, während er an anderen, näher gelegenen oder entfernteren Punkten wenig oder nichts hörte. Die Schallstrahlen waren also durch die Linse aus Kohlensäure so gebrochen worden, daß sie sich in einem Punkte wieder vereinigten, und somit ist also ihre Ablenkung durch Refraction bewiesen.

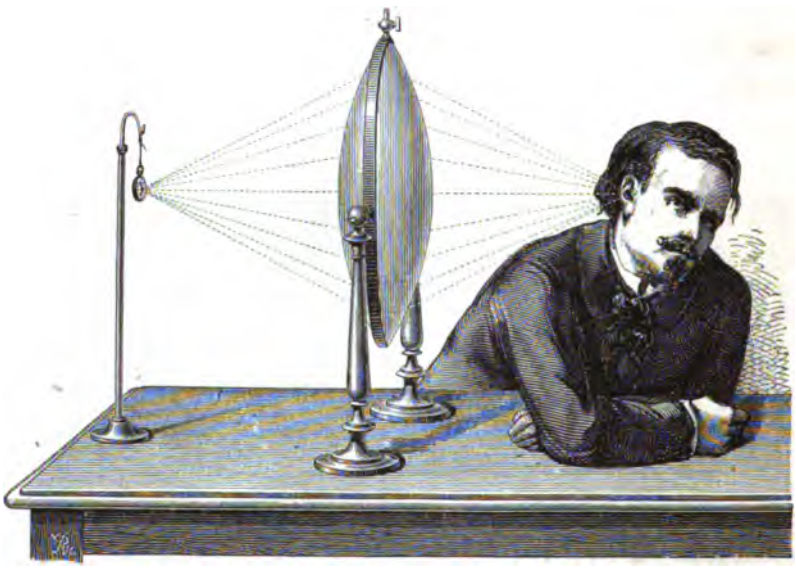


Fig. 100. Brechung des Schalles. Apparat nach Sondhaus.

Zweites Kapitel.

Die Schallschwingungen.

§ 1. Schwingungen fester, flüssiger und luftförmiger Körper.

Der Schall besteht in einer schwingenden oder oscillirenden Bewegung; er kann nur in solchen Körpern entstehen, die einen ziemlichen Grad

Digitized by Google

von Elasticität besitzen, d. h. deren Theilchen sich in einer gewissen gegenseitigen Lage mit solcher Stärke zu erhalten suchen, daß sie immer wieder in diese Lage zurückzukehren streben, wenn sie aus ihr entfernt werden. Verschiebt man daher die Molecüle solcher Körper durch einen Schlag, durch Reibung, oder durch irgend ein anderes Mittel gegeneinander, so kehren sie mit einer gewissen Geschwindigkeit wieder in ihre Ruhelage zurück, schwingen aber vermöge der einmal erlangten Geschwindigkeit wie Pendel über dieselbe hinaus und gelangen erst zur Ruhe, nachdem sie eine Reihe von Oscillationen vollendet haben. Diese Schwingungen

Fig. 101. Schwingungen einer gespannten Saite.

übertragen sich nach allen Seiten hin auf die benachbarten Körper, dieselben mögen fest, flüssig oder luftförmig sein, und gelangen endlich in das Ohr, wo sie auf die Nerven, die eigens diesem Zwecke dienen, wirken und im Gehirn die Schallempfindung erzeugen, wenn ihre Geschwindigkeit und Schwingungsweite von geeigneter Größe sind.

Von der Existenz der schwingenden Bewegung kann man sich sehr leicht überzeugen. Streicht man eine gespannte Saite mit einem Violinbogen, oder reißt man sie in ihrer Mitte mit dem Finger so, daß sie einen Ton giebt, so scheint sie, gegen einen dunklen Hintergrund betrachtet, von dem Ende nach der Mitte zu dicker zu werden und eine Anschwellung

Digitized by Google

zu besitzen, die aber nur durch das schnelle Hinundherschwingen, das wir in seinem einzelnen Phasen nicht verfolgen können, entsteht (Fig. 101): die Saite erscheint unserem Auge gleichzeitig in den äußersten und in allen mittleren Lagen, weil unsere Netzhaut jeden Eindruck eine Zeit lang festhält, und weil daher die Saite schon in eine neue Lage gelangt ist, ehe unser Auge den Eindruck der vorigen verloren hat.

Befestigt man einen Metallstab an dem einen Ende in einem Schraubstocke und biegt man das andere Ende mit dem Finger ein wenig zur

Fig. 102. Schwingungen eines Metallstabes.

Seite, so sieht man den Stab, nachdem er freigelassen ist, eine Reihe von Oscillationen ausführen, deren Schwingungsweite allmählich abnimmt und endlich ganz verschwindet (Fig. 102); zugleich hört man auch einen Ton von bestimmter Höhe, der aber zugleich mit den Schwingungen erlöscht.

Streicht man den Rand einer Glas- oder Metallglocke mit einem Violinbogen, so hört man auch hier sehr laute Töne, die ihre Entstehung ebenfalls den Schwingungen der Glocke verdanken: denn stellt man neben

Digitized by Google

der Glocke eine Spitze auf, welche in der Ruhelage noch einen kleinen Abstand von der Glocke hat, so hört man, wenn ein Ton erregt wird, das Anschlagen des Glases gegen diese Spitze. Man vernimmt kurze, trockne Schläge, die sich vom Tone der Glocke wesentlich unterscheiden. Hängt man eine Hollundermarkkugel an einem Faden so auf, daß sie die Glocke berührt, so wird dieselbe während des Tönens immer wieder fort gestoßen, so oft sie auch in ihre ursprüngliche Lage zurückkehren mag (Fig. 103). Legt man eine kleine Kugel in eine Metallschale, so geräth

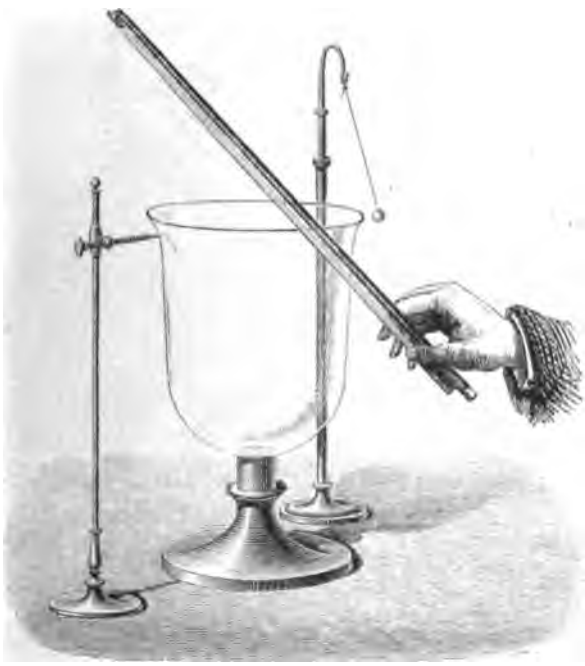


Fig. 103. Schwingungsbewegung einer Glasglocke.

dieselbe in hüpfende Bewegung, sobald die Schale durch Streichen zum Tönen gebracht wird (Fig. 104), und zeigt durch diese Bewegungen an, daß sich auch die Schale in Schwingungen befindet.

An dieser Stelle wollen wir nun eine Beschreibung des früher erwähnten Trevelyan-Instrumentes (Fig. 105) einschalten. Dasselbe besteht aus einer länglichen Platte von Eisen oder Messing, dessen untere Seite der ganzen Länge nach eine Furche mit scharf vorspringenden Rändern trägt, und die an einem längeren Stabe befestigt ist. Erhitzt man den Körper und lehnt man ihn dann gegen eine kalte Bleimasse,

Digitized by Google

die oben in einer Kante zugeschärft ist, so hört man einen deutlichen Ton, der so lange anhält, bis sich die Temperatur in beiden Metallen mehr ausgeglichen hat. Die Entstehung dieses Tones denkt man sich

Fig. 104. Schwingungen einer Metallschale.

in folgender Weise: berührt der eine Rand das Blei beim Auflegen eher als der andere, so wird sich dieses Metall unter ihm ausdehnen, wird

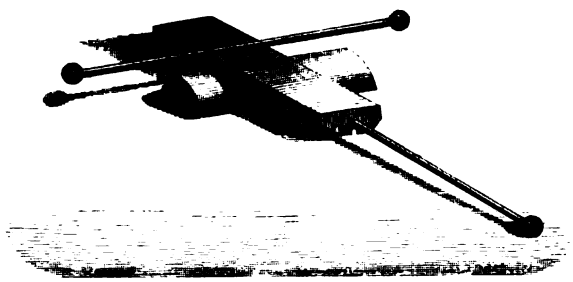


Fig. 105. Trevelyan-Instrument.

eine kleine Erhöhung bilden (Fig. 106) und ihn zurückstoßen; unterdessen ist auch der andere Rand zur Berührung gekommen und wird nun seinerseits in gleicher Weise zurückgestoßen. So werden die Stöße an

Digitized by Google

beiden Rändern abwechseln und die Platte in eine schwingende Bewegung versetzen, welche sich bis in unser Ohr weiter verbreitet und demselben als Ton erscheint. Befestigt man an der Platte eine längere Querstange, deren Enden Kugeln tragen, so wird die Schwingungsbewegung dadurch etwas verzögert und läßt sich an den Kugeln mit dem Auge verfolgen. Um die Schwingungsbewegung noch anschaulicher zu machen, befestigte Tyndall in der Mitte der Platte einen kleinen Silberspiegel und ließ auf diesen einen Strahl eines electrischen Lichtes fallen; den zurückgeworfenen Strahl fing er auf einem Schirme auf und brachte so die Schwingungsbewegungen zur Anschauung, sobald das Instrument tönte.

Fig. 106. Trevelyan-Instrument. Ursache der schwingenden Bewegung.

Wir haben hier eine Reihe von Fällen kennen gelernt, in denen

Fig. 107. Schwingungen in einer Flüssigkeit.

uns die Schwingungsbewegung tönender Körper sichtbar wird, und werden noch andere erwähnen, wenn wir erst davon sprechen werden, wie man die Schallschwingungen messen kann: jetzt wollen wir nur noch

Digitized by Google

hinzufügen, daß die Schwingungen fester Körper auch unserem Gefühlssinne wahrnehmbar werden; denn berührt man eine klingende Saite, Platte oder Glocke mit dem Finger, so fühlt man deutlich die Stöße, welche sie gegen diesen ausführt.

Auch flüssige und luftförmige Körper gerathen in Schwingung, wenn in ihnen ein Schall entsteht oder sich ausbreitet, wie man z. B. auf folgende Weise zeigen kann. Füllt man ein Glas zur Hälfte mit Wasser und streicht man dann den Rand entweder an einer Stelle mit dem Violinbogen, oder im Kreise herum mit dem feuchten Finger, so sieht man auf der Oberfläche der Flüssigkeit eine Menge Streifen, die sich gewöhnlich in vier oder sechs Hauptgruppen theilen, und die um so enger sind, je höher der Ton ist (Fig. 107). Steigert man die Intensität des Tones, so werden die Schwingungen so lebhaft, daß sich Wasser in Form von feinen Tropfen, wie Sprühregen, von der Oberfläche der einzelnen Gruppen loslöst.

Fig. 108. Schwingungen einer Luftsäule.

Befestigt man endlich eine Pfeife auf einer Windlade, so kann man auch hier zeigen, daß beim Tönen der Pfeife die Luft in Schwingungsbewegung geräth, indem man in das Innere durch einen Faden einen Rahmen einsenkt, der mit einer feinen Haut bespannt ist, und diese Haut mit Sand bestreut (Fig. 108). Sobald die Pfeife tönt, sieht man den Sand lebhaft auffliegen: durch den Schall wird also die Luft in schwingende Bewegung versetzt, und diese Bewegung theilt sich der Haut und dadurch dem Sande mit. Diese Bewegungen der Luft werden bei einem starken Schalle sehr heftig, sodaß z. B. beim Lösen einer Kanone die Fenster in der Nachbarschaft klirren, ja sogar springen.

Durch alle bisher erwähnten Thatsachen ist also bewiesen, daß der Schall in Schwingungen besteht, welche zunächst von den Molecülen elastischer Körper, mögen dieselben fest, flüssig oder luftförmig sein, ausgeführt werden und sich durch die verschiedenen zwischenliegenden Mittel hindurch bis zu unserem Gehörwerkzeuge fortpflanzen.

Digitized by Google

Hieraus erklärt sich auch, warum der Schall sich nicht im luftleeren Raume fortpflanzt: wird unter dem Recipienten einer Luftpumpe eine Glocke angeschlagen, so geräth sie selbst zwar in Schwingungen, diese pflanzen sich aber gar nicht, oder doch nur in sehr unvollkommener Weise durch das Kissen, das den Apparat trägt, und durch das geringe Quantum Luft fort, das sich noch im Recipienten befindet.

§ 2. Höhe der Töne.

Die Töne, welche unser Ohr treffen, unterscheiden sich durch verschiedene Eigenschaften, unter denen ihre Höhe sowohl in physikalischer, als in musikalischer Hinsicht die wichtigste ist. Wir werden sehen, worin diese Verschiedenheit ihren natürlichen Grund hat: wie sich dagegen die Töne von verschiedener Höhe selbst für unser Ohr unterscheiden, das läßt sich ebensowenig mit Worten beschreiben, wie der Unterschied zwischen Roth und Grün. Eine zweite, von der Höhe durchaus verschiedene Beziehung ist die Stärke oder Intensität; denn ein und derselbe Ton kann bald laut, bald leise erklingen, ohne seine Höhe im Geringsten zu ändern. Endlich bezeichnen wir noch einen Unterschied, den wir bei den Tönen bemerken, als die Klangfarbe derselben: es kann sehr wohl ein und derselbe Ton in genau gleicher Stärke auf einer Violine oder auf einer Clarinette gespielt, oder auch von einer menschlichen Stimme gesungen werden, und doch klingt er in jedem dieser Fälle unserem Ohre anders, sodaß wir bei einiger Uebung, auch ohne uns durch das Auge zu überzeugen, unterscheiden können, in welcher Weise der Ton hervorgebracht wurde. Die Klangfarbe ist es auch, welche uns von der Anwesenheit bekannter Personen in Kenntniß setzt und uns dieselben wiedererkennen läßt, noch ehe wir sie gesehen haben.

Fragen wir zunächst nach der Höhe der Töne, so werden wir durch einige ziemlich einfache Versuche belehrt, daß dieselbe einzig von der Zahl der Schwingungen abhängt, welche der tönende Körper in einer gewissen Zeit, z. B. in einer Secunde, ausführt, und welche also in derselben Zeit durch die Luft oder andere Mittel bis in unser Ohr gelangen. Die Vorrichtungen, durch welche man diesen Satz nachweisen kann, und durch welche es sogar möglich ist, die Zahl der Schwingungen zu be-

Digitized by Google

ſtimmen, die in einer Secunde erfolgen müſſen, damit man einen Ton von gegebener Höhe höre, wollen wir jetzt beſchreiben.

Wir erwähnen zuerſt das Zahnrad von Savart (Fig. 109). Ein Rad, deſſen Rand mit einer Anzahl gleich weit von einander abſtehender Zähne beſetzt iſt, ſteht durch einen Treibriemen in Verbindung mit einem großen Schwungrade, das durch eine Kurbel in gleichmäßige Umdrehung verſetzt wird; an der Axe des Zahnrades iſt ein Zählwerk angebracht, an welchem man die Zahl der Umdrehungen in einer be-

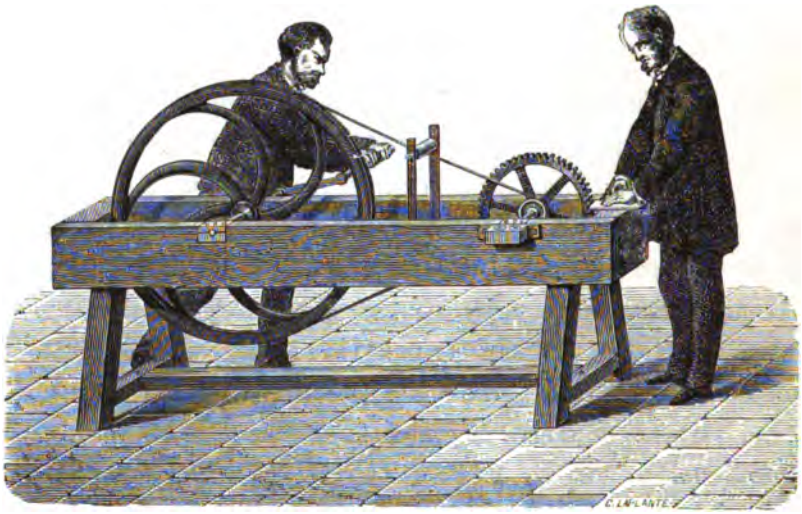


Fig. 109. Savart's Zahnrad zur Beſtimmung der Schwingungszahlen der Töne.

ſtimmten Zeit ableſen kann, die Zähne aber läßt man gegen eine Karte ſchlagen. So lange man nun das Rad mit ſehr geringer Geſchwindigkeit umdreht, hört man den Schlag jedes einzelnen Zahnes; ſobald man aber die Geſchwindigkeit ſteigert, ſo kann unſer Ohr die einzelnen Schläge nicht mehr unterſcheiden, ſondern empfindet dieſelben in ihrem Zuſammenhange als einen anhaltenden Ton, deſſen Höhe ungeändert bleibt, wenn man die Umdrehungsgeſchwindigkeit conſtant erhält. Beobachtet man nun während einer beſtimmten Zeit einen Ton von beſtimmter Höhe und lieſt man nun am Zählwerk ab, wie viele Umdrehungen die Axe in dieſer Zeit gemacht hat, ſo braucht man dieſe Zahl nur mit der Zahl der Zähne zu multipliciren und durch die Zahl der Secunden zu dividiren, um die Zahl der Schwingungen für die gegebene Tonhöhe zu finden. Mit dieſer Vorrichtung hat Savart noch Töne gehört, als ſich

Digitized by Google

ein Rad mit 600 Zähnen in der Secunde vierzig Mal um seine Axe drehte, also Töne, deren Schwingungszahl 24000 betrug; damit schien die äußerste Grenze der Hörbarkeit erreicht zu sein; allein später ist bewiesen worden, daß noch höhere Töne auf unser Ohr wirken, wie wir weiter unten besprechen werden*).

Noch größere Genauigkeit beim Zählen der Schwingungen, als durch das Zahnrad, kann man durch die Sirene erzielen, welche Cagniard-Latour erfunden hat. Dieser Apparat (Fig. 110 und 111) besteht aus

Fig. 110. Sirene nach Cagniard-Latour.

Fig. 111. Innere Ansicht und Querschnitt der Sirene.

einem Windkasten, in dessen Deckel sich eine Anzahl Löcher befinden, die gleichmäßig in einem Kreise vertheilt sind. Vor dem Deckel befindet sich eine Metallscheibe, welche um eine Axe drehbar und ebenfalls mit Löchern durchbohrt ist, die mit den Löchern des Deckels genau übereinstimmen. Die Durchbohrungen des Deckels sind schräg, was zur Folge hat, daß, wenn sich die Löcher der Scheibe genau vor den Löchern des Deckels befinden, ein Luftstrom aus dem Windkasten nicht allein frei durch sie austreten kann, sondern zugleich auch die Scheibe fortstößt und in

*) Wir wollen nicht versäumen hier zu erwähnen, daß wir beim Schalle immer nach sogenannten Doppelschwingungen rechnen, daß also z. B. die Schwingung einer Saite erst vollendet ist, wenn sie nach beiden Seiten hin ausgeschlagen hat und wieder in die Gleichgewichtslage zurückgekehrt ist; beim Pendel hatten wir nach einfachen Schwingungen gezählt.

Digitized by Google

Umdrehung versetzt. Durch diese Bewegung selbst werden nun die Oeffnungen des Deckels durch die dichten Theile der Scheibe geschlossen, um sogleich wieder frei zu werden, sobald sich die Scheibe um den Zwischenraum zwischen zwei Löchern weiter gedreht hat. Während daher die Scheibe eine Umdrehung vollendet, erhält die Luft ebensoviel Stöße, als die Scheibe Löcher hat, und diese Stöße pflanzen sich als Schwingungen durch die Luft weiter fort und erscheinen unserem Ohre als ein Ton, dessen Höhe constant bleibt, wenn die Umdrehungsgeschwindigkeit sich nicht ändert. Um die Zahl der Umdrehungen leicht bestimmen zu können, trägt die Axe an ihrem oberen Ende einige Schraubengänge, die in die Zähne eines kleinen Rades eingreifen und dasselbe bei jeder Umdrehung

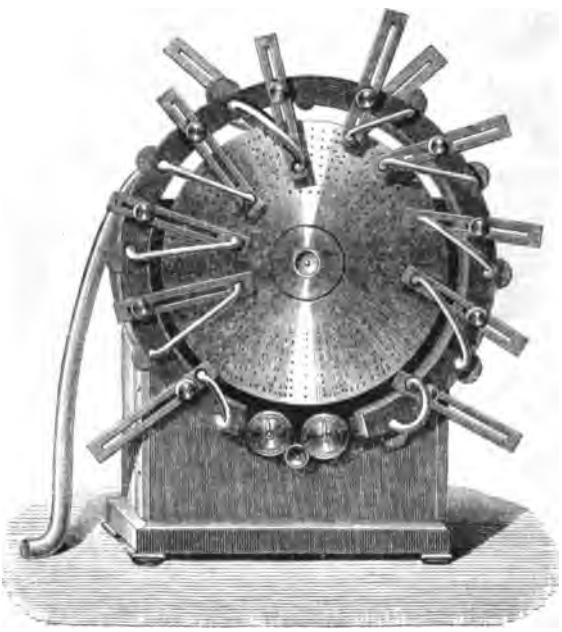


Fig. 112. Sirene nach Seebeck.

der Axe um je einen Zahn weiter drehen; mit diesem Rade ist aber ein Zeiger verbunden, der sich auf einem äußerlich angebrachten Zifferblatte bewegt, das in ebensoviele Theile getheilt ist, als das Rad Zähne hat. Endlich ist an dem Rade ein Hebel befestigt, der bei jeder Umdrehung desselben einmal in ein zweites Zahnrad eingreift und dieses um einen Zahn weiter rückt. Trägt also z. B. das erste Rad 100 Zähne, so giebt der Zeiger des zweiten Rades auf seinem Zifferblatte die Hunderter

Digitized by Google

der Umdrehungen der Scheibe an. Durch eine Feder können die Zahnräder leicht ausgerückt und wieder eingestellt werden: man wird sie also erst einstellen, wenn der Ton die gewünschte Höhe erreicht hat, und wieder ausrücken, wenn eine bestimmte Zeit verflossen ist.

Auch wenn man Wasser durch einen hohen Druck durch den Windkasten hindurchtreten läßt, erklingt die Sirene, und verdankt gerade dieser Erscheinung ihren Namen; für uns aber ist dieser Vorgang von besonderer Wichtigkeit, weil er beweist, daß die Flüssigkeiten selbst in Schwingungen versetzt werden können, ohne daß eine oscillirende Bewegung von Außen, etwa durch einen festen Körper auf sie übertragen wird.

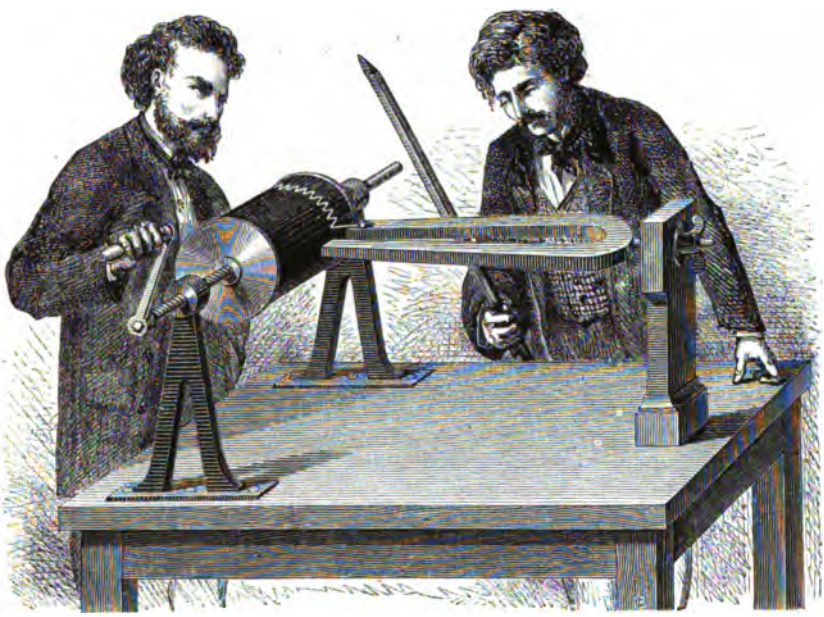


Fig. 113. Aufzeichnung der Schallschwingungen durch das Vibroskop.

Seebeck hat die Sirene in soweit abgeändert, als er die Luft durch Kautschuckröhren gegen die Löcherreihen einer Scheibe, die durch ein Uhrwerk in Umdrehung versetzt wird, strömen läßt (Fig. 112). Dadurch, daß die Scheiben in mehreren Kreisen verschiedene Zahlen von Löchern besitzen, und daß man die Luft durch mehrere Kautschuckschläuche aus einer gemeinsamen Windlade nach einer oder mehreren dieser Löcherreihen leiten kann, ist es möglich, die verschiedenen Töne gleichzeitig erklingen zu lassen, und andere ähnliche Experimente anzustellen.

Digitized by Google

Endlich ist es möglich, durch die schwingenden Körper selbst die Schwingungen aufzeichnen zu lassen, ein Verfahren, das zuerst von Savart in Vorschlag gebracht wurde. Die Apparate, die hierzu dienen, heißen Vibroskope (Fig. 113) und bestehen aus einer Stimmgabel, an deren Ende eine Spitze befestigt ist, welche auf einem sich drehenden und mit Ruß geschwärzten Cylinder Wellenlinien verzeichnet. Aus der Zahl

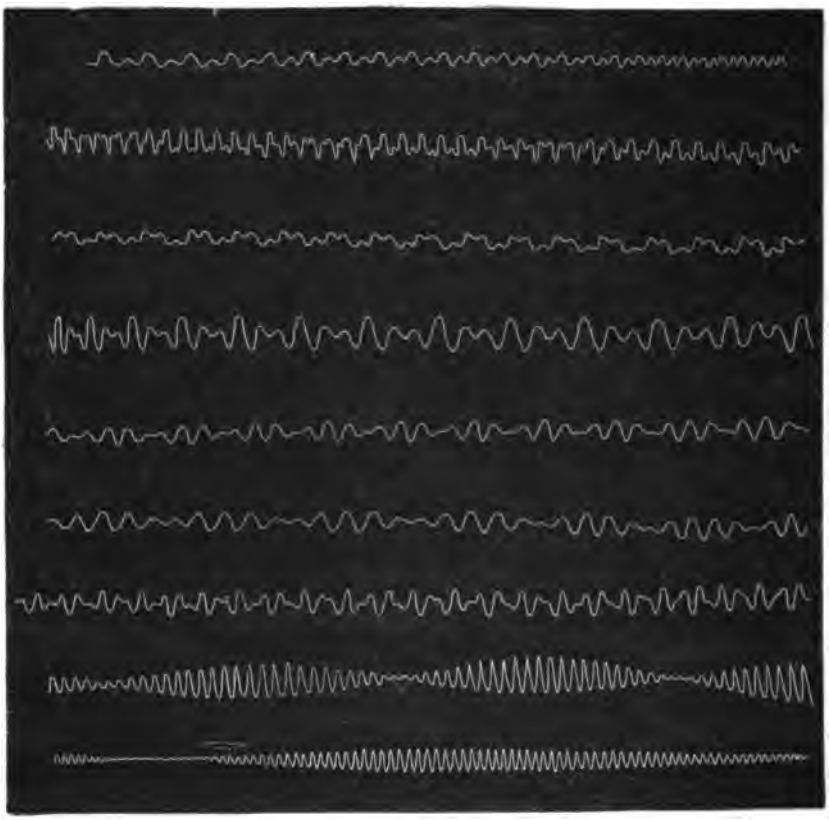


Fig. 114. Beispiele für die Combination zweier paralleler Schwingungsbewegungen.

der Wellen läßt sich hierbei die Zahl der Schwingungen leicht bestimmen, sobald man die Umdrehungsgeschwindigkeit des Cylinders kennt. Wendet man an Stelle des Cylinders ein geschwärztes Papier an, das man an der Zinke einer zweiten Stimmgabel befestigt, und bewegt man die Spitze der ersten Stimmgabel über das Papier, während beide schwingen, so wird sie eine Linie verzeichnen, in der die Schwingungen beider Gabeln zum Ausdrucke kommen. In Fig. 114 und 115 sind einige solcher

Digitized by Google

Linien verzeichnet, wie man sie durch Combination von Gabeln von verschiedener Größe und daher auch von verschiedener Tonhöhe erhalten

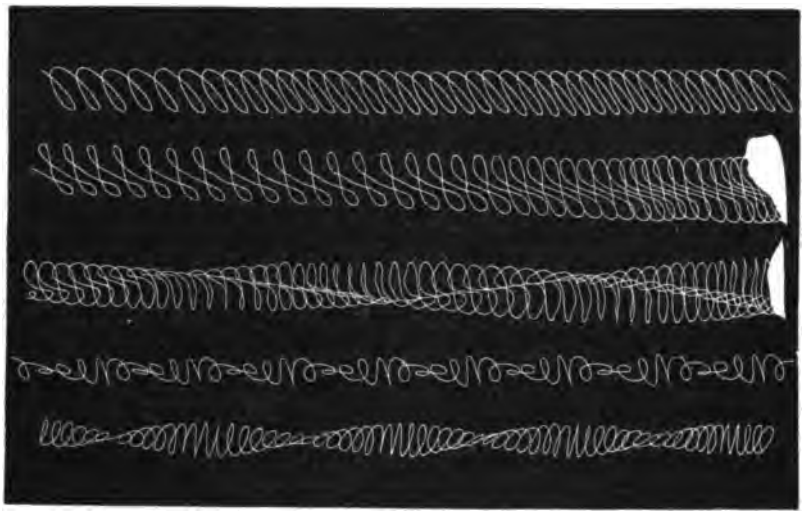


Fig. 115. Beispiele für die Combination zweier rechtwinkeliger Schwingungsbewegungen.

hat, und zwar waren die Schwingungsrichtungen beider Gabeln in Fig. 114 parallel, in 115 aber senkrecht zu einander.

§ 3. Stärke des Schalles.

Alle Versuche, die wir im vorigen Paragraphen erwähnten, gaben das gemeinsame Resultat, daß die Tonhöhe einzig und allein von der Geschwindigkeit abhängt, mit welcher die Schwingungen auf einander folgen: und weder die Stärke des Tones, noch die Natur des Materiales, noch die eigenthümliche Beschaffenheit, die man als Klangfarbe bezeichnet, waren auf dieselbe von Einfluß. Was nun die Stärke oder Intensität selbst anlangt, so ist diese wieder abhängig von der Weite, bis zu welcher sich die Theilchen bei einer Schwingung von der Mittellage entfernen, wie man leicht durch mehrere Versuche zeigen kann. Setzt man eine Saite in Bewegung, indem man sie mit dem Bogen streicht oder mit dem Finger reißt, so sieht man, wie die Schwingungsweiten immer kleiner werden, wenn sich die Saite selbst überlassen ist, und zugleich hört man auch die Abnahme der Tonstärke: je stärker man mit dem Bogen auf-

Digitized by Google

drückt, desto größer die Oscillation und desto stärker auch der Ton. Dabei bleibt aber der Ton immer von derselben Höhe, woraus wir schließen müssen, daß die Zahl der Schwingungen, die in der Zeiteinheit erfolgen, ungeändert bleibt, daß also zum Zurücklegen einer Schwingung immer dieselbe Zeit erforderlich ist: ist daher der Ton stark, so muß jedes Theilchen in derselben Zeit einen größeren Weg zurücklegen, es bewegt sich also dann schneller in seiner Bahn.

Wird ein elastischer Körper in Schwingungen versetzt, sodaß er einen Ton giebt, so entfernen sich nicht alle seine Molecüle gleich weit aus ihrer Ruhelage, ihre Schwingungen haben also nicht alle gleiche Weite, ja es giebt sogar immer einzelne Punkte, die trotz der Oscillation der anderen immer in Ruhe bleiben. Auch würden manche Theile eines Körpers, wenn sie für sich allein wären, schneller, andere wieder langsamer schwingen, sodaß sich die Bewegungen gegenseitig ausgleichen und eine mittlere Geschwindigkeit ergeben müssen, gerade so, wie wir es beim zusammengesetzten Pendel gesehen haben. Denkt man sich z. B. eine Glocke in lauter einzelne Ringe zerlegt, so würde jeder Ring für sich, wenn er durch einen Hammer geschlagen wird, so schwingen, daß er die Form von Ellipsen annimmt, deren große Axen abwechselnd in zwei auf einander senkrechte Richtungen fallen; die weitesten Ringe würden aber zu diesen Schwingungen mehr Zeit gebrauchen, als die engsten. Da nun die Ringe mit einander zu einem festen Körper verbunden sind, so wird die Folge sein, daß die Geschwindigkeit der engeren verzögert, die der weiteren beschleunigt wird.

Von der Weite der Schwingungen, welche die Molecüle ausführen, hängt also die Stärke des Tones bei seinem Entstehen ab: da aber der Schall in unser Ohr nur dadurch gelangen kann, daß die zwischenliegenden Luftmassen zugleich mit in Schwingung versetzt werden, so muß sich die Stärke der Tonempfindung nach der Luftmenge richten, welche in Mitleidenschaft gezogen wird: die Intensität des Schalles wird also um so bedeutender, je größer die Dimensionen des tönenden Körpers sind. Doch nicht die Luft allein wird mit in Schwingungen versetzt, auch andere feste Körper nehmen oft an dieser Bewegung theil und tragen dann zur Verstärkung des Tones wesentlich bei. So ist es eine bekannte Thatsache, daß dieselbe Saite, wenn sie über ein dickes Bret gespannt wäre, einen weit schwächeren Ton geben würde, als wenn sie über dem

Digitized by Google

elastischen Körper einer Violine schwingt, welcher selbst mit in Schwingungen geräth. Ebenso tönt eine Stimmgabel sofort viel lauter, sobald man während des Schwingens ihren Stiel auf einen Tisch stützt.

Breitet sich ein Ton in freier Luft aus, ohne daß er auf feste Körper trifft, die ihn zurückwerfen oder selbst mit in Schwingung versetzt werden, so nimmt seine Stärke für unser Ohr mit der Entfernung ab, und zwar im quadratischen Verhältnisse; die Intensität in 10 m Abstand ist also viermal so groß, als in 20 m, neunmal so groß, als in 30 m Entfernung. Werden daher an zwei Punkten Töne erregt, von denen der eine viermal so stark ist, als der andere, so wird ein Beobachter, der sich in der Verbindungslinie beider Punkte in ein Drittel Entfernung befindet, vom schwächeren aus gerechnet, glauben, gleich starke Töne zu hören. Der Grund für dieses Gesetz liegt darin, daß sich die Schallwellen in Form von Kugelschalen vom Erregungspunkte aus in der Luft verbreiten: die Luftmassen, die in bestimmten Entfernungen in Schwingung versetzt werden, müssen sich daher verhalten, wie die Kugeloberfläche, deren Radien diese Entfernungen sind, und also, wie in der Geometrie gezeigt wird, wie die Quadrate dieser Linien. Da das Volumen der bewegten Massen also mit der Entfernung so bedeutend wächst, die erregende Kraft aber nicht zunimmt, so muß die Schwingungsweite jedes einzelnen Molecüles in demselben Grade abnehmen, weil sonst Kraft aus Nichts geschaffen wäre.

Pflanzt sich dagegen der Schall durch eine cylindrische Röhre fort, so kann er sich nicht über eine größere Fläche ausbreiten, und wird am anderen Ende ziemlich ungeschwächt anlangen: eine geringe Abnahme der Intensität, wie auch der Fortpflanzungsgeschwindigkeit hat Regnault freilich nachgewiesen, wie wir bereits früher erwähnt haben; doch mag der Grund für diese Abnahme wohl in der Reibung an den Röhrenwänden zu suchen sein, durch welche die Bewegung wesentlich gehindert wird. Die Ausbreitung in Röhren war der Gegenstand von Untersuchungen, welche Biot in der Wasserleitung von Paris anstellte: noch bei einer Entfernung von einem Kilometer bemerkte er durchaus keine Abnahme in der Stärke des Schalles, sodaß zwei Personen in diesem Abstande mit einander sprechen konnten, ohne ihre Stimme irgend anzustrengen.

Aus dieser Eigenschaft der Röhren erklären sich manche Erscheinungen der Schallverbreitung in Gebäuden, deren Mauern und Decken gewölbt

Digitized by Google

sind: die Riefen der Wölbungen bilden hierbei die Canäle, in denen sich der Schall in gleicher Stärke fortpflanzt. So findet man an vielen Orten Kirchen und Kapellen, oder auch Brückenbogen, in denen sich zwei Personen, die sich auf entgegengesetzten Seiten befinden, besprechen können, ohne daß die zwischen ihnen stehenden etwas bemerken. Am berühmtesten sind in dieser Beziehung die Steinbrüche von Syracus, in denen sich die noch jetzt durch eigenthümliche Schallwirkungen berühmte grotta della favella, Grotte der Sprache, befindet, und die wohl die Ueberreste der Staatsgefängnisse der Beherrscher dieser Stadt, des sogenannten Ohres des Dionys, sein mögen. Wie die Sage berichtet, waren jene Gefängnisse so eingerichtet, daß jener Tyrann in einem gewissen Raume alle Gespräche belauschen konnte, welche von seinen Gefangenen geführt wurden, was sich nur durch das Vorhandensein von Schallröhren erklären läßt.

Die bekannte Thatsache, daß sich der Schall in der Nacht weiter ausbreitet, als am Tage, hat man wohl dadurch zu erklären versucht, daß in der Nacht viel weniger Geräusche unser Ohr treffen, sodaß wir jedes einzelne deutlicher unterscheiden können. Wenn dieser Grund auch sicher mit wirkt, so ist er doch nicht der einzige, der diese Erscheinung erklärt; von der größten Wichtigkeit ist gewiß hierbei der Umstand, daß die Temperatur und die Dichtigkeitsverhältnisse der Atmosphäre bei Nacht viel gleichmäßiger sind, sodaß der Schall bei seiner Ausbreitung viel seltener auf Schichten von verschiedener Dichtigkeit trifft, die ihn ablenken, brechen und zerstreuen. Welchen Einfluß aber die verschiedene Dichtigkeit der Luftschichten auf die Ausbreitung des Schalles besitzt, dafür liefern die S. 134 erwähnten Versuche über die Schallgeschwindigkeit einen merkwürdigen Beweis. Während nämlich die zwölf Schüsse, die in Montlhéry abgegeben wurden, sämmtlich in Villejuif gehört wurden, hörte man in Montlhéry von den in Villejuif abgefeuerten zwölf Schüssen nur sieben. Nun liegt Villejuif nahe bei Paris, seine Atmosphäre ist daher wohl noch von den mannigfaltigen Dunstmassen, welche die Großstadt aussendet, imprägnirt, sodaß der Schall sogleich bei seiner Entstehung auf vielfache Hindernisse stößt und sich nicht so weit fortpflanzen kann.

Auch in kalter Luft dringt der Schall weiter, als in warmer; so ist nach den Berichten der Polarreisenden die menschliche Stimme in den Eisgegenden des hohen Norden bis auf erstaunliche Entfernungen hin

Digitized by Google

hörbar. Doch mag auch hierbei die größere Gleichmäßigkeit in der Dichtigkeit der Luftschichten zur Geltung kommen, ebenso wie sich der Schall bei ruhiger Luft weiter hin ausbreitet, während der Wind den Ton abschwächt, selbst wenn er in der Richtung vom tönenden Körper nach unserem Ohre hin weht. Daß die Stärke des Schalles auch von unserer eigenen Stellung zum tönenden Körper abhängt, daß es nicht gleichgültig ist, ob der Hornbläser den Schalltrichter seines Instrumentes nach uns zurichtet oder von uns abwendet, ob wir uns vor oder hinter der Mündung einer Kanone befinden, bedarf ebensowenig der Erwähnung, wie, daß vorgestellte Gegenstände den Schall aufhalten und gleichsam einen Schatten der Lautlosigkeit hinter sich werfen.

Die Umstände, welche die Stärke des Schalles abzuändern vermögen, sind sehr mannigfaltig, sodaß es schwer hält, die größte Entfernung zu bestimmen, bis zu welcher ein Schall überhaupt gehört wird; in den Fällen, wo man ein Geräusch in sehr großen Entfernungen gehört hat, diente wahrscheinlich der feste Erdboden mehr als Träger des Schalles, als die Luft. Hierher gehört wohl das oben erwähnte Beispiel, daß nach Humboldt Erderschütterungen und vulkanische Ausbrüche in Entfernungen von 800 bis 1200 Kilometern gehört wurden.

Chladni berichtet eine Reihe von Fällen, welche beweisen, daß der Kanonendonner weithin hörbar ist: bei der Belagerung von Genua hörte man ihn in einer Entfernung von 90 italienischen Meilen, bei der Belagerung von Manheim im Jahre 1795 am anderen Ende von Schwaben in Nördlingen und Wallerstein, und bei der Schlacht von Jena zwischen Wittenberg und Treuenbrietzen. „Ich habe selbst, sagt er, die Kanonenschläge in Wittenberg, in einer Entfernung von 17 deutschen Meilen (126 Kilometer) gehört, weniger durch die Luft, als durch die Erschütterungen fester Körper, wenn ich das Ohr gegen eine Mauer lehnte."

Gleichwohl pflanzt sich der Schall auch durch die Luft bisweilen auf große Entfernungen hin fort: wie das Rollen des Donners und der Knall bei der Explosion der Meteore, welche manchmal in sehr großer Höhe bersten. So berichtet Chladni von Meteoren, deren Explosion erst 10 Minuten nach Erscheinen der Feuerkugel gehört wurde, was auf eine Höhe von mindestens 200 Kilometer schließen läßt. Auch die Feuerkugel, welche am 14. Mai 1864 im südlichen Frankreich beobachtet wurde, zeigt dieselbe Eigenthümlichkeit, und es wurden bei ihr bis zu

Digitized by Google

4 Minuten Zwischenzeit zwischen ihrem Erscheinen und dem Knall beobachtet. „Um zu erklären, sagt über diesen Gegenstand Daubrée, daß eine Explosion, welche in den so dünnen Luftschichten erfolgt, an der Oberfläche der Erde und in einer so bedeutenden horizontalen Ausdehnung ein Geräusch von solcher Stärke hervorbringt, muß man annehmen, daß ihre Heftigkeit in den hohen Luftschichten alles übersteigt, was wir kennen.“ Man darf hierbei aber nicht unberücksichtigt lassen, daß der Schall möglicherweise durch den Wiederhall, den die Schichten von verschiedener Dichtigkeit bewirken, verstärkt wird, ebenso wie ja auch der Donner bei einem Gewitter durch dieselben Verhältnisse eine Steigerung erfährt.

Man weiß noch wenig, wodurch die Verschiedenheit der Klangfarbe verursacht wird; um aber das kennen zu lernen, was darüber bis jetzt bekannt ist, müssen wir vorher noch einige andere Erscheinungen erklären, ohne welche wir uns nicht verständlich machen können.

Fragt man endlich, bis zu welchen Grenzen die Töne vernehmlich sind, so ist es klar, daß dieselben von der Empfindlichkeit unseres Ohres abhängig sind. Durch einige Versuche war Savart zu der Annahme gekommen, daß die geringste Zahl von Schwingungen, welche unser Ohr noch als zusammenhängenden Ton auffaßt, 8 in der Secunde sei; doch meint Helmholtz, daß sich hierin Savart geirrt habe, und daß mindestens 16 Doppelschwingungen erforderlich seien. Als obere Grenze fand Savart vermittels seines Zahnrades die Zahl von 24000 Doppelschwingungen; allein mit Hülfe von Stimmgabeln, die sich auf Resonanzböden befanden, hat Despretz noch hörbare Töne von ungefähr 38000 Doppelschwingungen hervorgebracht, welche aber in dem Ohre eine schmerzhafte, stechende Empfindung bewirken.

§ 4. Ausbreitung des Schalles in der Luft. — Schallwellen.

Damit der Schall, der von einem tönenden Körper ausgeht, in unser Ohr gelange, muß die zwischenliegende Luft, wie schon erwähnt, selbst in Schwingungen gerathen, d. h. es müssen in ihr Verdichtungen und Verdünnungen auf einander folgen, welche sich mit nahezu constanter Geschwindigkeit weiter verbreiten, wenn die Luft überall dieselbe Dichtigkeit und Temperatur besitzt. In welcher Weise diese Schallwellen in

Digitized by Google

der Luft verlaufen, und wie man ihre Länge messen kann, davon wollen wir jetzt eine Erklärung zu geben versuchen.

Hält man die Zinke einer Stimmgabel, die sich in Schwingung befindet, vor das offene Ende einer Röhre, so werden sich diese Schwingungen auf folgende Weise der eingeschlossenen Luft mittheilen. Befindet sich zunächst die Zinke in ihrer größten Entfernung a"b" (Fig. 116) von der Röhre, und schwingt sie in die entgegengesetzte Lage a'b', so wird sie die Luft vor sich her stoßen und in der Mündung der Röhre verdichten; diese Verdichtung wird ihren größten Werth erreicht haben, wenn sich die Zinke der Röhre am meisten genähert hat, von diesem Augenblicke an wird die verdichtete Luft in der Röhre weiter fließen, die Verdichtung also in derselben weiterrücken. Nun beginnt aber auch

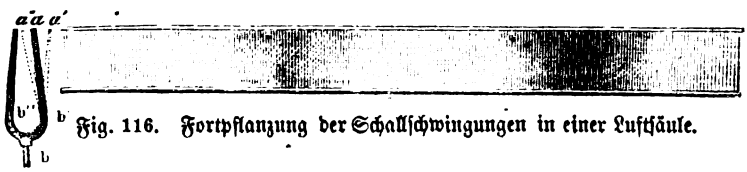


Fig. 116. Fortpflanzung der Schallschwingungen in einer Luftsäule.

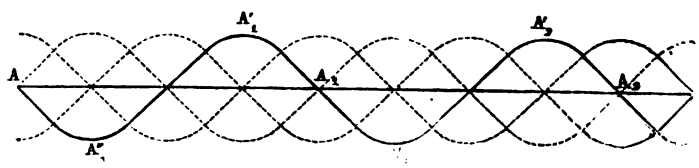


Fig. 117. Bildliche Darstellung einer Schallwelle.

die Zinke wieder ihren Rückweg nach a"b", wobei die Luft in den Raum, den sie frei läßt, nachdrängt, sodaß sie nun am Anfange der Röhre sich verdünnt. Beim nächsten Schwunge der Zinke folgt nun wieder, wie zuvor, eine Verdichtung, welche ebenfalls bald darauf durch eine Verdünnung abgelöst wird. Jeder vollen Schwingung der Zinke entsprechen also in der Röhre zwei aufeinander folgende Zustände der Luft: in dem einen Stücke ist die Luft verdichtet und bildet einen Wellenberg, in dem anderen ist sie verdünnt und bildet ein Wellenthal. Beide zusammen geben erst eine volle Welle, welche sich durch die ganze Ausdehnung der Röhre gleichmäßig weiter bewegt.

Um den Zustand der Luft in den einzelnen Punkten durch ein Bild anschaulich zu machen, verfährt man folgendermaßen. Man errichtet auf einer geraden Linie, welche die Richtung der Röhren und damit auch

Digitized by Google

die Richtung, nach welcher sich die Wellen ausbreiten, darstellen soll, an den Stellen, wo die Luft verdichtet, Senkrechte nach oben, an den Stellen, wo sie verdünnt ist, nach unten, und giebt diesen Senkrechten Längen, die dem Grade der Verdichtung oder Verdünnung proportional sind (Fig. 117). Verbindet man nun die Endpunkte dieser Senkrechten, so erhält man eine wellenförmige Linie A A''$_1$ A'$_1$ A$_1$, die durch ihre Biegungen die Verdichtungen und Verdünnungen der Luft veranschaulicht. Nach einiger Zeit wird jede Verdichtung und jede Verdünnung etwas weiter gerückt sein und dem entsprechend auch die Wellenlinie nach einander in die Lagen kommen, welche in der Figur durch Punkte angedeutet sind. Während der Zeit, daß die Zinke der Stimmgabel ein Mal hin und her schwingt, legt die Welle den Weg A A$_1$, also ihre eigene Länge zurück, in der doppelten, dreifachen Zeit, also auch den doppelten, dreifachen Weg.

Man sieht hieraus, daß es nun leicht ist, die Länge einer Welle für einen Ton von bestimmter Höhe zu berechnen. Nehmen wir an, daß der Ton in der Secunde 450 Schwingungen mache, und daß sich der Schall bei der herrschenden Temperatur, welche 15° betragen mag, mit einer Geschwindigkeit von 340^m fortpflanze, so ist klar, daß in dem Augenblicke, in welchem der Ton diese Entfernung erreicht hat, von der Stimmgabel 450 Schwingungen ausgegangen sind, daß sich also auf der Strecke von 340^m 450 Wellen befinden: daraus findet man mithin die Länge einer Welle gleich 755^{mm}.

Breitet sich der Schall von dem Punkte, wo er erregt wird, nicht längs einer Röhre, sondern gleichmäßig nach allen Seiten hin aus, so werden sich die Verdichtungen und Verdünnungen in allen Richtungen in gleichem Abstande vom Schwingungsmittelpunkte befinden. Die Wellenberge und die Wellenthäler bilden Kugelschalen, ohne daß sich dabei die Fortpflanzungsgeschwindigkeit und die Wellenlänge ändert; das Einzige, was sich ändert, ist die Schwingungsweite der Theilchen und damit die Stärke des Schalles, wie wir schon früher erwähnten. Figur 118 soll die Art und Weise darstellen, wie sich die Schallwellen um einen Schwingungsmittelpunkt verbreiten: durch die dunklere Schattirung sind dabei die Wellenberge, durch die lichtere die Wellenthäler angedeutet, die eingezeichneten Wellenlinien aber machen zugleich die Abnahme der Stärke bemerklich.

Digitized by Google

Wenn ein System von Schallwellen die Luft durchdringt, so gerathen zwar die einzelnen Luftmolecüle in eine lebhafte Bewegung, die aber nur eine oscillirende ist: jedes Theilchen schwingt zwar hin und her, allein, während sich die Verdichtungen und Verdünnungen im Raume immer weiter fortpflanzen, kehrt jedes Molecül immer wieder an seinen Platz zurück und durchwandert nicht den Raum. Um auch dies anschaulich zu machen, benutzt man gewöhnlich ein Seil, das an einem Ende befestigt ist und das man mit der Hand straff zieht: ertheilt man demselben einen

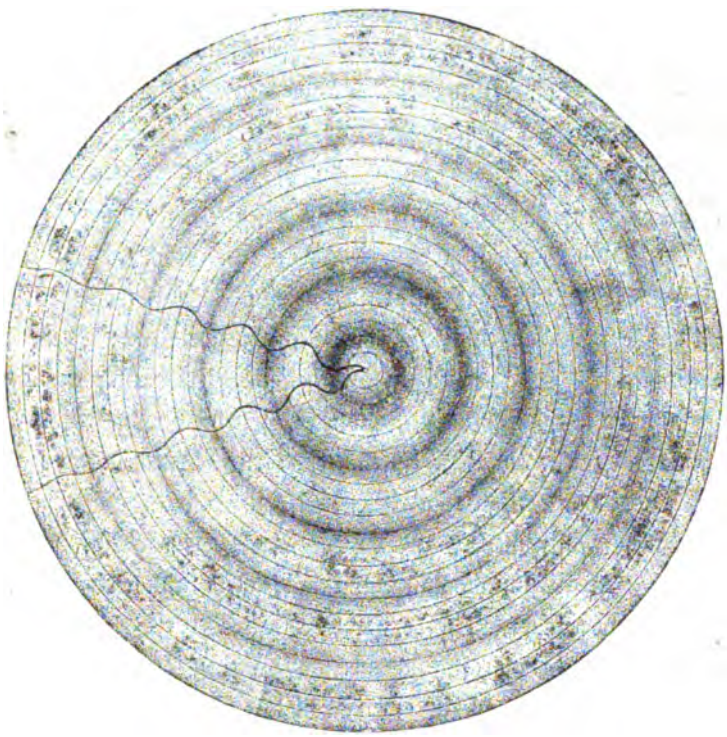


Fig. 118. Ausbreitung einer Schallwelle in einem nichtbegrenzten Mittel.

kurzen, starken Schlag, so sieht man, wie die Ausbiegung, wie eine Welle, auf dem Seile weiterläuft und wieder zurückkehrt, wenn sie den Befestigungspunkt erreicht hat, wobei die einzelnen Theile des Seiles zwar seitwärts schwingen, aber natürlich nicht von der Stelle rücken. Dieselbe Beobachtung kann man ebenso bei Wasserwellen anstellen: wirft man einen Stein ins Wasser, so sieht man, wie sich die Wellenberge und Wellenthäler in Form von Ringen um den getroffenen Punkt ausbreiten, wie dieselben immer weiter werden, dabei aber an Höhe und Tiefe ab-

Digitized by Google

nehmen: das Wasser selbst aber fließt nicht weiter und ebenso schwankt ein auf seiner Oberfläche schwimmender Körper auf und ab, rückt aber nicht von seiner Stelle fort. Nur einen sehr wesentlichen Unterschied zeigt die Bewegung des Schalles in der Luft gegenüber den beiden eben erwähnten Erscheinungen: bei der Schallbewegung schwingen die einzelnen Luftmolecüle vorwiegend in der Richtung hin und her, in welcher sich die Welle selbst ausbreitet, also in der Richtung der Kugelradien, während die Theilchen des Seiles und der Wasseroberfläche sich in einer Richtung bewegen, die zur Ausbreitungsrichtung senkrecht ist. Die Luft macht beim Schall *longitudinale*, das Seil und die Wasseroberfläche *transversale* Schwingungen. Wir werden später sehen, daß auch die Schwingungen des Aethers, die wir als Lichtschwingungen bezeichnen, der letzteren Kategorie angehören.

Wenn wir auf diese Weise uns eine klare Vorstellung darüber verschafft haben, wie sich ein einfacher Schall in der Luft verbreitet, so kann nun die weitere Frage entstehen, wie es wohl möglich ist, daß gleichzeitig mehrere Wellensysteme die Luft durchwandern können, ohne sich gegenseitig zu stören und in die größte Verwirrung zu gerathen. Wie ist es möglich, daß bei einem Concert, wo die verschiedensten Instrumente uns ihre Schallwellen zusenden, dieses Durcheinander dennoch unserem Ohre wohl klingt, ja daß wir im Stande sind, den Klang jedes einzelnen Instrumentes zu unterscheiden? Theoretisch wurde diese Frage schon von Bernouilli und Euler dadurch beantwortet, daß sie nachwiesen, daß in einem und demselben Mittel verschiedene oscillirende Bewegungen bestehen und sich durchkreuzen können, ohne sich gegenseitig zu stören: wir wollen nur an einen leicht ausführbaren Versuch erinnern, der auch diese Erscheinung anschaulich macht. Wirft man in einen Teich mehrere Steine, so kann man die Ringwellen, die jeder einzelne bildet, trotz aller Durchkreuzung, mit dem Auge leicht verfolgen, namentlich wenn die Schwingungsweiten, also mit anderen Worten die Höhen der Wellenberge nicht zu groß sind. Besonders schön stellt sich diese Erscheinung auf der Oberfläche des Quecksilbers dar, und wir wollen in Fig. 119 eine Zeichnung des Vorganges einschalten, wie er bei einem Versuche erfolgt, den Weber in seiner Wellenlehre erwähnt. Füllt man ein elliptisches Gefäß mit Quecksilber und läßt man Quecksilbertropfen auf den einen Brennpunkt der Ellipse fallen, so bilden sich um diesen Punkt

Digitized by Google

kreisförmige Wellen, welche von den Wänden so stark zurückgeworfen werden, daß sie sich schließlich im zweiten Brennpunkte concentriren: von dort verbreiten sie sich wieder in Kreisform und vereinigen sich in gleicher

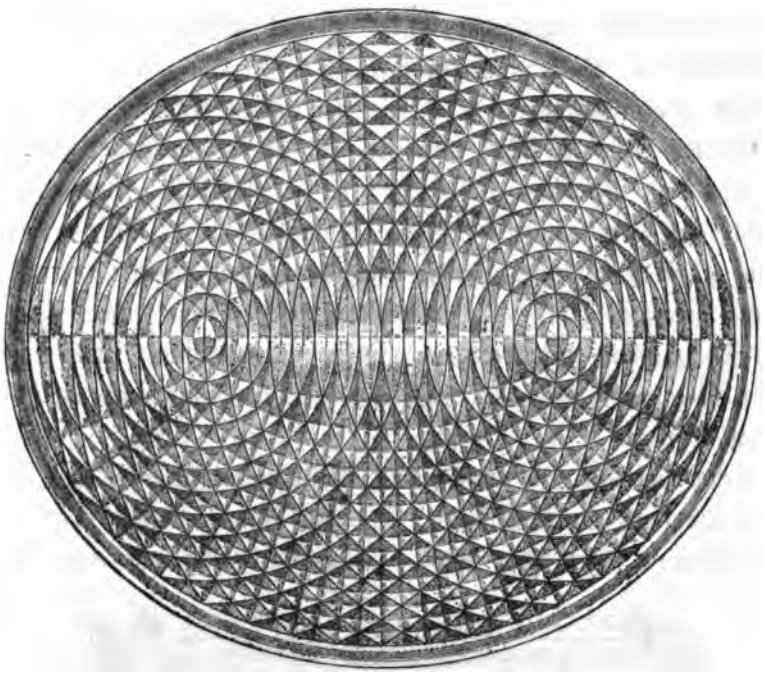


Fig. 119. Ausbreitung, Reflexion und Durchkreuzung der Wellen auf einer Quecksilberoberfläche.

Weise im ersten Brennpunkte, und so immer fort, solange man Tropfen auffallen läßt. Dabei sieht man die feinen Wellenringe sich durchkreuzen, kann aber jedes System mit Leichtigkeit verfolgen.

§ 5. Gesetze der Schallschwingungen der Saiten.

Betrachten wir eine Violine: wir sehen, daß dieselbe mit vier Saiten von verschiedener Dicke bespannt ist, welche an Wirbeln befestigt sind und durch dieselben straffer gezogen werden können. Diese Saiten liegen an zwei festen Punkten auf, sodaß sie gleiche Länge haben, und geben Töne an, welche in einem gewissen Verhältniß zu einander stehen, von dem wir weiter unten sprechen werden. Ist dieses Verhältniß nicht eingehalten, sind also die Saiten verstimmt, so wird die richtige Stimmung dadurch wieder hergestellt, daß man den Wirbel nach der einen oder anderen

Digitized by Google

Seite ein wenig dreht: wird die Drehung so ausgeführt, daß dadurch die Saite straffer gespannt wird, so wird der Ton höher; läßt man mit der Spannung nach, so wird er tiefer. Da aber 4 Töne zur Ausführung von Musikstücken nicht genügen, so kann der Spieler die Zahl der Töne beliebig vergrößern, indem er durch Aufsetzen der Finger der linken Hand die Saiten beliebig verkürzt.

Aus allem Gesagten geht hervor, daß eine gewisse Beziehung besteht zwischen der Höhe der Töne einerseits, und der Länge, Dicke, Spannung und auch dem Material andererseits; da die Tonhöhen selbst aber von der Zahl der Schwingungen in einer Secunde abhängig sind, so muß es Gesetze geben, nach welchen sich die Schwingungszahl aus den vorerwähnten Größen berechnen läßt. Die wichtigsten dieser Gesetze waren schon den alten Philosophen, besonders den Pythagoräern bekannt; zum Abschluß ist die Theorie aber besonders durch Taylor (1716) und Lagrange (1759) gebracht worden.

Wenn wir jetzt jene Gesetze aus Versuchen ableiten wollen, so benutzen wir dazu ein Instrument, das den Namen Monochord oder Sonometer führt (Fig. 120). Dasselbe besteht aus einem Kasten

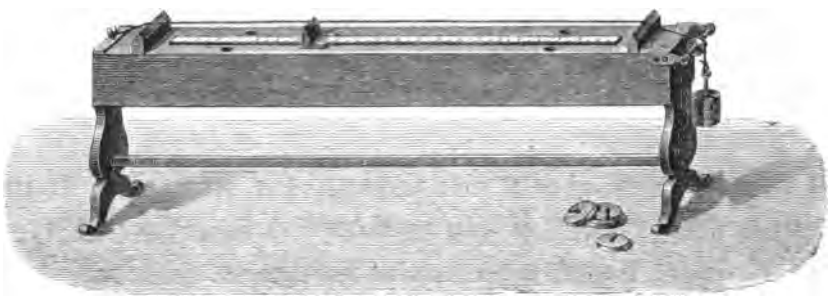


Fig. 120. Monochord.

aus Tannenholz, der zur Verstärkung des Schalles dient, und über welchen eine Saite gespannt ist; diese Saite ist an dem einen Ende an einem Stift befestigt, geht dann über zwei Stege hinweg, durch welche ihre Länge genau bestimmt ist, schlingt sich weiter um eine kleine Rolle und endigt in einer Schlinge, an welcher sich Gewichte anhängen lassen, durch die man die Saite spannt. Um die Länge beliebig verkürzen zu können, ist noch ein dritter, beweglicher Steg angebracht, den man längs eines unter der Saite liegenden Maßstabes, auf dem sich die jedesmalige Verkürzung ablesen läßt, verschieben kann.

Digitized by Google

Man spannt nun die Saite, die am Apparate befestigt ist, durch ein angehängtes Gewicht so, daß sie einen klaren, reinen Ton von bestimmter Höhe giebt, und bestimmt mit Hilfe einer Sirene die Schwingungszahl, die dieser Tonhöhe entspricht, so weiß man, wie viele Schwingungen die Saite in einer Secunde macht, wenn sie ihrer ganzen Länge nach schwingt. Diese Zahl betrage z. B. 440, während die Entfernung der beiden festen Stege gleich 120 cm ist. Grenzen wir hierauf durch den beweglichen Steg der Reihe nach die Hälfte, ein Drittel, ein Viertel, ein Zwölftel ab, und lassen wir den jedesmal kürzeren Theil für sich allein schwingen, so hören wir Töne, deren Schwingungszahl wir wieder mittels der Sirene gleich 880, 1320, 1760, 5280 bestimmen. Eine Zusammenstellung dieser Zahlen und der Zahlen für die Saitenlänge läßt sofort das Gesetz erkennen, das für diese Größen gilt:

Länge der Saite		120	60	40	30	10
	oder	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{12}$
Schwingungszahl		440	880	1320	1760	5280
	oder	1	2	3	4	12

Wir dürfen also nach diesen Versuchen das Gesetz aussprechen: Die Schwingungszahl ist der Saitenlänge umgekehrt proportional.

Läßt man nun die Saite wieder der ganzen Länge nach schwingen, ändert aber das angehängte Gewicht, so wird man finden, daß die Schwingungszahl sich verdoppelt, verdreifacht, vervierfacht, wenn das spannende Gewicht viermal, neunmal, sechzehnmal so groß wird: Die Schwingungszahlen wachsen also im Verhältnisse der einfachen Zahlen, wenn die spannenden Gewichte im Verhältnisse der Quadratzahlen wachsen.

Verfertigt man weiter aus demselben Stoffe mehrere Saiten von verschiedener Dicke, giebt man ihnen gleiche Länge, indem man sie zwischen denselben Stegen befestigt, und spannt man sie durch Gewichte von gleicher Größe, so werden die dickeren Saiten tiefere Töne geben, ihre Schwingungszahl ist also geringer, als die der dünneren, und zwar ergeben auch hier die Versuche, daß die Schwingungszahl dem Durchmesser umgekehrt proportional ist.

Ein viertes Gesetz endlich findet man bei Anwendung von Saiten aus verschiedenem Material. Verfertigt man Saiten aus Eisen und

Digitized by Google

Platin von gleicher Dicke, giebt man ihnen gleiche Länge und spannt man sie durch dasselbe Gewicht, so giebt die Saite aus Eisen doch einen höheren Ton, als die Saite aus Platin. Hat man z. B. bei einem solchen Versuche die Schwingungszahl der letzteren gleich 1000 gefunden, so findet man die der ersteren gleich 1640: beide Zahlen verhalten sich wie 1 : 1,64; ihre Quadrate aber wie 1 : 2,69. Vergleicht man andererseits das specifische Gewicht des Eisen 7,8 mit dem des Platin 21,04, so findet man deren Verhältniß gleich 1 : 2,69, also wieder die letzterwähnten Zahlen. Man kann also folgenden Satz als viertes Gesetz aussprechen: Die Quadrate der Schwingungszahlen stehen

Fig. 121. Harmonische Töne. Schwingungsknoten und Bäuche.

im Verhältnisse der specifischen Gewichte oder Dichtigkeiten der Stoffe, aus denen die Saiten verfertigt sind.

Die erwähnten vier Gesetze gelten aber nur für den Fall der transversalen Schwingungen, welcher eintritt, wenn man die Saiten mit dem Finger reißt oder mit dem Bogen streicht: reibt man dagegen die Saite mit einem Stück Zeug, das mit Kolophonium bestrichen ist, der Länge nach, so giebt sie auch dann einen sehr hohen, scharfen Ton, der dadurch entsteht, daß die Molecüle longitudinale Schwingungen ausführen. Da aber diese Schwingungen niemals zur Anwendung kommen, sondern sich höchstens bei ungeschicktem Geigenspiele in unangenehmer Weise unserem

Digitized by Google

Ohre bemerklich machen, so wollen wir nicht weiter auf dieselben eingehen; wohl aber müssen wir noch eine sehr wichtige Erscheinung besprechen, nämlich das Schwingen der Saiten in einzelnen Abtheilungen, woraus sich die harmonische Verwandtschaft der Töne ergiebt.

Berührt man den Mittelpunkt der Saite des Monochordes mit dem Finger und streicht man sie mit dem Violinbogen, so giebt sie, wie schon erwähnt, einen Ton, der doppelt so viele Schwingungen macht, als wenn sie der ganzen Länge nach schwingt, und den man die obere Octave des letzteren nennt. Dabei ist aber das Wichtigste, daß nicht nur der Theil der Saite in Schwingung geräth, der mit dem Bogen gestrichen

Fig. 122. Harmonische Töne. Schwingungsknoten und Bäuche.

wird, sondern auch der andere, abgegrenzte Theil. Man kann dieses Schwingen schon mit dem Auge wahrnehmen, wenn man die Saite gegen einen dunklen Hintergrund betrachtet (Fig. 121): besser aber macht man es dadurch bemerklich, daß man auf sie kleine zusammengebrochene Streifen Papier, sogenannte Reiter, aufsetzt, die sofort, sobald das Schwingen beginnt, abgeworfen werden.

Grenzt man nun mit dem Finger den dritten Theil der Saite ab, (Fig. 122) und streicht man mit dem Bogen den kürzeren Theil, so macht der Ton dreimal so viel Schwingungen, als wenn die Saite in ganzer Länge schwingt: er ist also noch höher, als der vorhergehende,

Digitized by Google

und wir bezeichnen ihn als Quinte desselben. Auch hier geräth der nicht gestrichene Theil mit in Schwingungen, theilt sich aber selbst wieder in zwei gleiche Theile, deren Grenzpunkt selbst in Ruhe bleibt, wie man schon deutlich sehen kann. Setzt man auch hier wieder auf diesen Punkt einen Reiter auf, so bleibt derselbe während der Schwingung in Ruhe, während die auf andere Stellen aufgesetzten Reiter abgeworfen worden. Die Saite hat sich also in drei schwingende Theile getheilt, deren Grenzpunkte in Ruhe bleiben und Knoten genannt werden, während die Punkte, die in der Mitte von zwei Knoten liegen am lebhaftesten schwingen und Bäuche heißen.

Auf dieselbe Weise gelingt es leicht, eine Saite weiter in vier, fünf, sechs Theile u. s. w. zu theilen: ja es ist bei einiger Geschicklichkeit auch möglich, diese Theilung durch vorsichtiges Streichen mit dem Violinbogen zu bewirken, ohne daß man mit dem Finger den einen Knotenpunkt berührt. Also auch ohne daß man etwas anderes vornimmt, als daß man dieselbe Saite in verschiedener Weise mit dem Bogen streicht, kann man bewirken, daß sie entweder ihrer ganzen Länge nach schwingt oder sich in 2, 3 ... Theile theilt, daß also der entstehende Ton entweder eine bestimmte Anzahl Schwingungen in der Secunde vollbringt, oder auch die doppelte, dreifache, ... Zahl derselben. Die Töne, welche sich auf diese Weise bilden, nennt man harmonische Obertöne des Grundtones; ihre Schwingungszahlen sind immer ganze Vielfache der Schwingungszahl des letzteren.

Endlich kann man eine Saite auch noch in Schwingungen versetzen, welche aus mehreren dieser einfachen Schwingungen zusammengesetzt sind: es kann also die Saite ihrer ganzen Länge nach schwingen, während jede Hälfte außerdem gleichzeitig noch ihre besonderen Schwingungen vollbringt, ebenso wie ja auch ein Pendel auf einem Schiffe fortschwingt und zugleich auch an den Schwankungen des Schiffes theilnimmt. In diesem Falle gelingt es unserem Ohre bei einiger Uebung leicht, die Schwingungen wieder von einander zu trennen; und wenn wir nur aufmerksam sind, so können wir in der Regel allemal, wenn eine Saite erklingt, außer dem eigentlichen Grundton derselben noch einige der harmonischen Obertöne oder Mitklinger zugleich mit vernehmen. Daß die Schwingungszahlen derselben ganze Vielfache der Schwingungszahl des Grundtones sind, ist für die Theorie der Musik sehr wichtig, und wir

Digitized by Google

werden bald hierauf zurückkommen. Befestigt man an der schwingenden Saite einen Stift, der auf einem berußten Papier, das vorbeigezogen wird, die Schwingungen aufzeichnet, so erhält man bei zusammengesetzten

Fig. 123. Zusammengesetzte Schwingungen der Töne.

Schwingungen Linien, wie sie in Fig. 123 dargestellt sind. Nicht nur die Saiten zeigen Schwingungsknoten und Bäuche, wir werden dieselben auch bei schwingenden Luftsäulen, wie auch bei Platten und Membranen wiederfinden.

§ 6. Gesetze der Schwingungen der Luft in Röhren.

Nachdem wir uns mit dem Schwingen der Saiten beschäftigt haben, wenden wir uns zu den Gesetzen, die bei anderen musikalischen Instrumenten, den Blasinstrumenten zur Geltung kommen. Der Haupttheil jedes Blasinstrumentes ist immer eine längere, prismatische oder cylindrische Röhre aus Holz oder Metall, die entweder in gerader Richtung verläuft oder zu mehreren Windungen gekrümmt ist, und in welcher die eingeschlossene Luftsäule durch Anblasen an dem mit einem Mundstücke versehenen Ende in Schwingung versetzt wird. Um die Gesetze kennen zu lernen, nach denen die Luftsäulen schwingen, wollen wir uns auf die einfache Form der Pfeifen, wie wir sie in den Orgeln finden, beschränken, und geben in Fig. 124 und 125 sowohl die äußeren Ansichten, als auch die Querschnitte einer prismatischen und einer cylindrischen Orgelpfeife, von denen die erstere in Holz, die andere in Metall ausgeführt ist.

Jede Pfeife besteht aus einem unteren Theile, dem Fuße, der in eine engere Röhre endigt, welche in einer Oeffnung der Windlade befestigt ist: oberhalb ist die Höhlung des Fußes durch eine Platte oder

Digitized by Google

ein keilförmiges Stück Holz, den Kern, bis auf eine schmale Oeffnung, die Kernspalte, geschlossen. Von dieser Stelle an rechnet man nun die eigentliche Röhre oder den Körper der Pfeife, welcher an der Seite gerade über der Kernspalte eine Oeffnung hat, die man den Mund oder Aufschnitt nennt; der obere und untere Rand des Aufschnittes heißen Ober- und Unterlippe. Läßt man Luft in den Fuß eintreten, so wird dieselbe in Form eines dünnen Stromes aus der Kernspalte austreten und sich gegen die Oberlippe, deren Rand geschärft ist, brechen: der eine

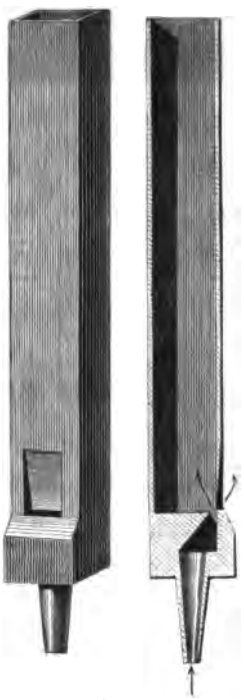


Fig. 124. Prismatische Orgelpfeife.

Fig. 125. Cylindrische Orgelpfeife.

Theil tritt neben der Oberlippe aus dem Aufschnitte heraus, der andere tritt in den Körper und verdichtet die Luft. Da nun diese Verdichtung nicht dauernd bestehen kann, so wird sie längs der Röhre abfließen, und da die Luft einmal in Bewegung ist und nicht sofort zur Ruhe gelangt, sobald die mittlere Dichtigkeit wieder hergestellt ist, so fließt die Luft in derselben Richtung noch eine Zeit lang weiter, und an der Stelle der Verdichtung erscheint eine Verdünnung. In gleicher Weise entstehen immer wieder neue Verdichtungen und Verdünnungen in der Röhre,

Digitized by Google

und diese Schwingungen erscheinen unserem Ohre als Ton, dessen Höhe von dem Material, aus dem die Pfeife angefertigt ist, nicht abhängt; man darf also annehmen, daß der Ton nur durch die Schwingungen der Luftsäule selbst hervorgerufen wird, und daß die Wände der Röhre bei seiner Entstehung nicht mit wirken.

Um die Gesetze dieser Schwingungen kennen zu lernen, ließ der Physiker Mersenne der Aeltere eine Reihe von Pfeifen anfertigen, welche genau gleiche Gestalt besaßen, deren Größe aber verschieden war (Fig. 126), und zeigte, daß die Schwingungszahlen der Töne, welche dieselben gaben, in umgekehrtem Verhältnisse zu den Dimensionen der Pfeifen standen: war sowohl Länge, als Breite, als Höhe bei der einen Pfeife doppelt, dreimal, ... so groß, als bei der anderen, so betrug die Schwingungszahl des durch sie erzeugten Tones nur die Hälfte, den dritten Theil, ... so viel, als die des Tones, den die andere angab. So wird die kleinere der in Fig. 126 abgebildeten Pfeifen die Octave vom Tone der größeren geben.

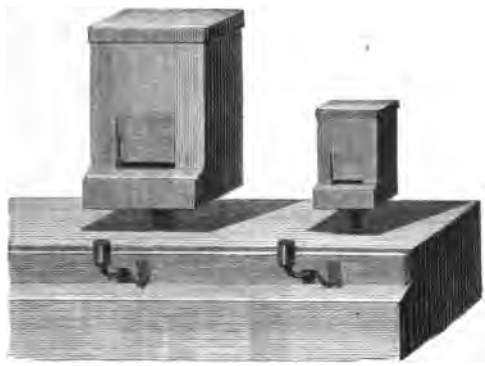


Fig. 126. Pfeifen von gleicher Gestalt.

Sind die Pfeifen ziemlich eng im Verhältniß zu ihrer Länge, so kann man durch verschiedenes Anblasen, besonders durch Veränderung der Stärke des Luftstromes, auf jeder derselben Töne von verschiedener Höhe hervorbringen, deren Verhältnisse wir weiter unten untersuchen wollen: für jetzt wollen wir nur den tiefsten derselben, den sogenannten Grundton der Pfeife ins Auge fassen. Vergleicht man nun die Grundtöne von Pfeifen von verschiedener Länge, so ergeben die Versuche, daß sich deren Schwingungszahlen umgekehrt wie die Längen verhalten: hat man daher vier Pfeifen, deren Längen im Verhältnisse der Zahlen 1, 2, 3, 4 stehen (Fig. 127), so werden in der Zeit, in welcher die Luft in der kleinsten 12 Schwingungen macht, die anderen drei deren 6, 4 und 3 hervorbringen. Dieses Gesetz gilt ebenso, wenn man lauter offene Pfeifen in Vergleich zieht, wie wenn man lauter solche anwendet, deren Enden durch Deckel geschlossen sind und die man gedackte Pfeifen nennt. Vergleicht

Digitized by Google

man dagegen eine gedackte und eine offene Pfeife von gleicher Länge, so findet man, daß der Ton der letzteren die Octave vom Tone der ersteren ist, daß er also in derselben Zeit doppelt so viele Schwingungen macht.

Bläst man eine längere, offene Pfeife in verschiedener Weise an, so hört man nach einander eine Reihe von Tönen, deren Schwingungszahlen im Verhältnisse der natürlichen Zahlenreihe 1, 2, 3, 4, 5, 6 . . .

Fig. 127. Schwingung der Luft in Pfeifen von verschiedener Länge.

wachsen, die also die harmonischen Obertöne des Grundtones der Pfeife sind: stellt man denselben Versuch mit einer gedackten Pfeife an, so verhalten sich dagegen die Schwingungszahlen der Töne wie die ungeraden Zahlen 1, 3, 5, 7 . . . Nimmt man daher eine gedackte und eine offene Pfeife von gleicher, und weiter eine offene Pfeife von doppelter Länge, so werden die Töne der letzteren durch die Reihe der natürlichen Zahlen

1 2 3 4 5 6 7 8 . . .

dargestellt, wogegen sich für die beiden anderen Zahlen ergeben:

Digitized by Google

für die offene Pfeife: . . 2 . . . 4 . . . 6 . . . 8 .
für die gedackte Pfeife: 1 . . . 3 . . . 5 . . . 7 . . .

Die Töne der langen Pfeife wiederholen sich also abwechselnd in den Tönen der beiden Pfeifen von halber Länge.

Zum Schlusse wollen wir noch bemerken, daß sich auch die Luftsäulen in einer Röhre, wenn sie in Schallschwingung gerathen, ebenso, wie die Saiten, theilen, und daß gewisse Stellen in ihnen dabei beständig in Ruhe bleiben, also Schwingungsknoten bilden. Man kann die Existenz derselben dadurch nachweisen, daß man das oben, S. 153, Fig. 108, dargestellte Verfahren anwendet: bringt man hierbei den mit einer Membran bespannten Rahmen an eine Stelle, an der sich ein Schwingungsknoten befindet, so bleibt der Sand ruhig liegen, während derselbe an anderen Stellen in lebhafte Bewegung geräth.

§ 6. Schallschwingungen der Stäbe und der Platten.

Streicht man einen Stab aus Holz, Glas, Metall oder einem anderen elastischen Stoffe, der Länge nach mit einem Tuche, das entweder angefeuchtet, oder mit Kolophoniumpulver bestreut ist, so hört man einen lauten, reinen Ton, dessen Höhe von der Elasticität der Substanz und der Länge des Stabes abhängt. Man hält hierbei den Stab mit den Fingern der einen Hand entweder an dem einen Endpunkte, oder im Mittelpunkte, oder in irgend einem anderen Punkte fest (Fig. 128),

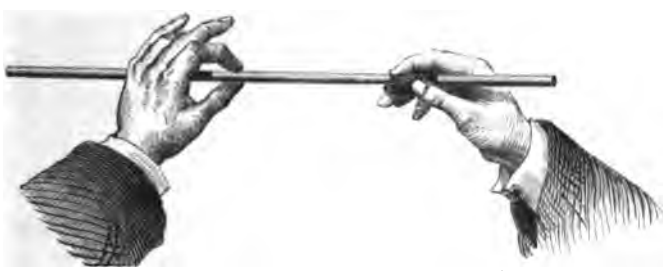


Fig. 128. Longitudinale Schwingungen der Stäbe.

oder besser noch, man spannt ihn an einem dieser Punkte in einen Schraubstock: so wird man finden, daß sich der Ton ändert, wenn man den Befestigungspunkt verlegt. Hat man zuerst den Endpunkt befestigt, darauf aber die Mitte, so ist der Ton, der jetzt gehört wird, die Octave des vorigen, macht also doppelt so viele Schwingungen: das Verhältniß

Digitized by Google

ist demnach dasselbe, wie zwischen zwei Pfeifen von gleicher Länge, von denen die eine gedackte dem am Ende befestigten, die andere offene dem in der Mitte gehaltenen Stabe entspricht. Auch die anderen Gesetze, denen die longitudinalen Schwingungen der Stäbe folgen, stimmen genau überein mit den Gesetzen, die für das Schwingen der Luftsäulen in Röhren gelten: auch bei den Stäben lassen sich harmonische Obertöne erzeugen, und weiter verhalten sich die Schwingungszahlen verschiedener Stäbe, die aus gleichem Material verfertigt sind, umgekehrt wie deren Längen.

Noch manche andere Körperform könnte man der Untersuchung unterwerfen, doch würde dies ein unerschöpflicher Gegenstand sein: daher beschränken wir uns nur noch auf die Betrachtung der Schwingungen der Platten und der Membranen.

Befestigt man eine dünne Platte aus Holz, Glas oder Metall, die in ihrer ganzen Ausdehnung recht gleichmäßig ist, und deren Umfang die Form eines Quadrates, regelmäßigen Polygones oder Kreises besitzt, mit ihrem Mittelpunkte auf einem Fuße oder klemmt man sie in diesem Punkte zwischen zwei Schrauben, so giebt sie verschiedene sehr hohe scharfe Töne, wenn man ihren Rand mit dem Violinbogen streicht und zugleich Punkte des Umfanges mit dem Finger der anderen Hand berührt (Fig. 129). Bestreut man die Platte mit trockenem, feinem Sande, so erkennt man sehr leicht, daß sich die Platte beim Schwingen in einzelne Theile theilt, die in heftige Bewegungen gerathen, während ihre Grenzlinien, welche *Knotenlinien* heißen, in Ruhe bleiben. Denn während der Sand an den schwingenden Stellen auffliegt, bleibt er auf den Knotenlinien ruhig liegen und bildet Figuren,

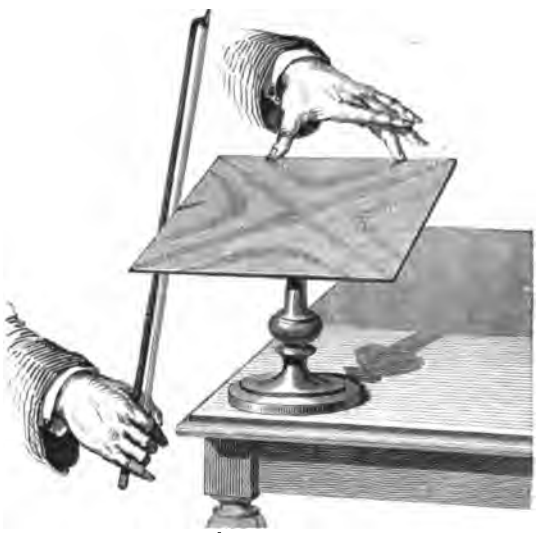


Fig. 129. Schwingungen einer Platte.

Digitized by Google

die man nach dem Entdecker als Chladni'sche Klangfiguren bezeichnet. Dadurch, daß man an verschiedenen Punkten des Randes mit dem Bogen streicht, daß man die Finger der anderen Hand an verschiedene Punkte ansetzt, und daß man endlich statt des Mittelpunktes einen andern Punkt befestigt, kann man Figuren in großer Mannigfaltigkeit erhalten, und wir geben in Fig. 130 und 131 einige Beispiele nach den Aufzeich-

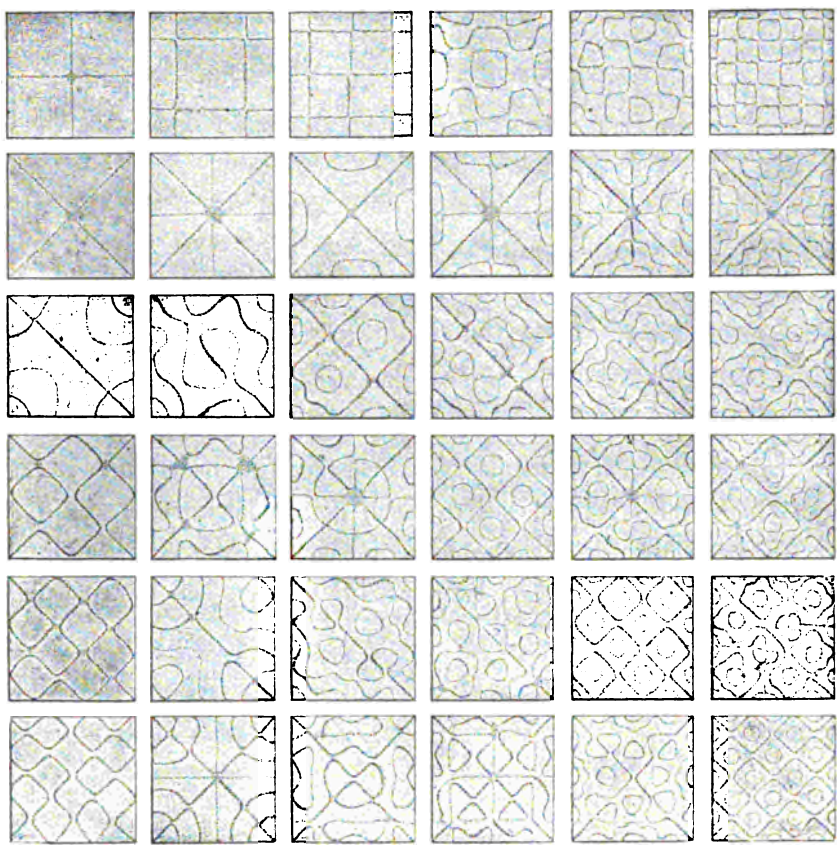


Fig. 130. Klangfiguren auf quadratischen Platten, nach Savart.

nungen Chladni's und Savart's, und bemerken dabei noch, daß die Töne, welche man hört, um so höher sind, je complicirter die entstehende Figur ist. Um die Gestalt der Figuren genau wiederzugeben, wendete Savart an Stelle des Sandes gummirtes Stärkemehl an und legte auf die Platte, sobald sich die Figur gebildet hatte, einen angefeuchteten Bogen Papier, an welchem das Mehl fest hängen blieb.

Betrachtet man die Formen in Fig. 130 genauer, so sieht man,

Digitized by Google

daß sich in den Figuren zwei Hauptrichtungen geltend machen, die eine parallel den Diagonalen, die andere parallel den Seiten: ebenso lassen sich auf den kreisförmigen Platten der Fig. 131 Linien unterscheiden, die in der Richtung des Radius verlaufen, und andere, welche concentrische Kreise bilden.

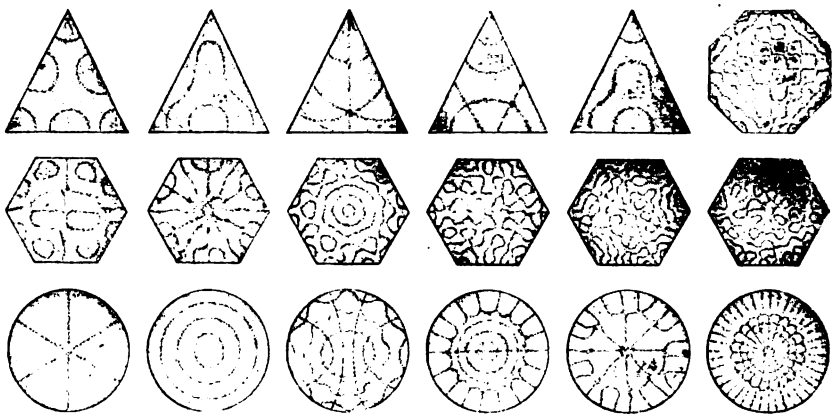


Fig. 131. Klangfiguren auf polygonalen und kreisförmigen Platten, nach Chladni und Savart.

Auch die Glocken theilen sich beim Schwingen in Abtheilungen, welche durch Knotenlinien begrenzt werden; doch ist es nicht möglich, dieselben durch Sand sichtbar zu machen: dagegen zeigt sich ihre Anwesenheit bei dem Versuche, der in Fig. 107 dargestellt ist, dadurch, daß das eingefüllte

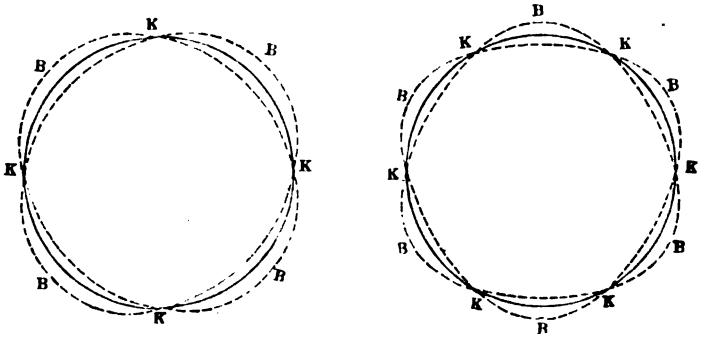


Fig. 132. Knoten und Bäuche einer schwingenden Glocke.

Wasser an einzelnen Stellen in Ruhe bleibt. Wie man sich das Schwingen der Glocken zu denken hat, das ist aus Fig. 132 ersichtlich: berührt man die Glocke an zwei Punkten, die um einen Viertelkreis von einander abstehen, und streicht man mit dem Bogen in der Entfernung von 45°

Digitized by Google

von dem einen dieser Punkte, so theilt sich die Glocke in vier Theile, die abwechselnd nach Außen und Innen schwingen; berührt man dagegen nur an einem Punkte und streicht im Abstande von 90°, so theilt sich die Fläche in sechs Theile. Auch die Theilung in 8, 10, 12 Theile gelingt ohne Schwierigkeit.

Ist ein Fell über einen Rahmen gespannt, so kann sein Rand an den Schwingungen nicht theilnehmen: es schwingt also entweder so, daß es sich in ganzer Fläche abwechselnd nach beiden Seiten hin durchbiegt, und zwar in der Mitte am stärksten, wobei es seinen tiefsten Ton giebt, oder es theilt sich durch concentrische oder radiale Knotenlinien in Abtheilungen, welche ebenfalls durch aufgestreuten Sand sichtbar gemacht werden können.

Die Gesetze, nach welchen die Schwingungszahlen in allen diesen Fällen sich richten, sind noch nicht vollständig erforscht: wir wollen daher nur die folgenden Thatsachen anführen. Verfertigt man aus demselben Material Platten von gleicher Fläche, aber verschiedener Dicke, so stehen die Schwingungszahlen im umgekehrten Verhältnisse der Dicken, sobald die Platten gleiche Klangfiguren zeigen: bei gleicher Dicke aber verhalten sie sich umgekehrt, wie die Flächen. Der tiefste Ton, den eine quadratische Platte angiebt, entsteht, wenn sie durch zwei Knotenlinien, die den Seiten parallel sind, in vier gleiche Theile getheilt wird: bilden die Knotenlinien dagegen die Diagonalen des Quadrates, so hört man die Quinte des vorigen Tones. Die Schwingungszahlen für complicirtere Klangfiguren mit den Zahlen für diese einfachen in Beziehung zu setzen, ist noch nicht gelungen.

Drittes Kapitel.

Die musikalischen Töne.

§ 1. Die Tonleiter.

Wie wir oben erwähnten, ist unserem Ohre ein Ton hörbar, wenn derselbe in einer Secunde mindestens 16 und höchstens 38000 Doppelschwingungen vollendet, innerhalb dieser Grenzen giebt es aber keine Schwingungszahl, die unser Gehörorgan nicht als Schall empfindet. Doch nicht alle diese Schallempfindungen werden unserem Ohre angenehm

Digitized by Google

sein, und auch diejenigen unter ihnen, welche für sich allein auf uns keinen unangenehmen Eindruck machen, dürfen nur dann gleichzeitig oder bald nach einander auf unseren Hörnerv treffen, wenn ihre Schwingungszahlen gewissen Bedingungen entsprechen: nur in diesem Falle sind sie für die Musik brauchbar.

Die einfachsten Gesetze über die Verhältnisse der Schwingungszahlen, die stattfinden müssen, damit die Töne harmonisch sind, damit sie sich also musikalisch an einander anreihen lassen, wollen wir in diesem Paragraphen entwickeln: zuvor aber müssen wir die Frage beantworten, unter welcher Bedingung jeder einzelne Schall uns Wohlgefallen erregt und dadurch für die Musik brauchbar wird. Betrachten wir eine Wasserfläche, so wird unser Auge die größte Befriedigung empfinden, wenn gleichmäßige Wellen in sanft gekrümmten Linien die Oberfläche kräuseln: durchkreuzen sich aber die Wogen in unregelmäßigen Bahnen, überstürzen sie sich, wenn der Sturm das Gewässer peitscht, so gewährt dies ein Bild der Unruhe, das uns bei aller Erhabenheit nicht befriedigen kann. Aehnlich die Eindrücke des Schalles: folgen die Wellen der Luft in gleichmäßigen Zwischenräumen und verdichtet und verdünnt sich dabei die Luft mit einer gewissen Regelmäßigkeit, so wird unser Ohr angenehm berührt; es entsteht ein *Ton*, dessen Höhe sich nach der Zahl der Schwingungen in der Secunde richtet, und Töne sind es fast ausschließlich, welche in der Musik Verwendung finden. Jeder andere Schall, der eine Zeit lang andauert, bei dem aber eine solche Regelmäßigkeit nicht wahrzunehmen ist, heißt ein *Geräusch*; ist dagegen die Dauer eines Schalles außerordentlich kurz, und sind dabei die Schwingungen sehr heftig, so nennen wir ihn einen *Knall*.

Auch die Geräusche sind sehr häufig nur Mischungen von Tönen von sehr verschiedener Höhe, welche aber unter sich nicht in einem solchen Zusammenhange stehen, daß wir sie als harmonische Töne ansehen dürften; ein geübtes Ohr kann dieselben gleichwohl von einander trennen und ihre gegenseitigen Höhenverhältnisse bestimmen. So lassen sich beim Brauden des Meeres, beim Murmeln des Baches, beim Flüstern des Laubes häufig Töne deutlich unterscheiden, die aber von anderen Geräuschen begleitet und durch dieselben gleichsam verdeckt werden. Bei anderen Geräuschen, wie z. B. beim Knarren der Räder an den Axen, beim Kritzeln eines Schieferstiftes auf der Tafel, ist dies dagegen nicht

Digitized by Google

möglich, und durch solche Geräusche wird auch unser Ohr auf alle Fälle sehr unangenehm berührt. Auch beim Knalle lassen sich verschiedene Tonhöhen unterscheiden, und die Explosion einer Kanone giebt nicht blos einen stärkeren, sondern auch einen tieferen Ton, als der Schuß aus einer Flinte; eine dünne Peitschenschnur giebt einen helleren Schlag, als eine starke; und Holzkugeln kann man von solcher Größe anfertigen, daß, wenn man sie der Reihe nach auf einen Tisch fallen läßt, man deutlich die ganze Tonleiter hört.

Kehren wir jetzt zu den Tönen zurück, so wollen wir nunmehr fragen, welches wohl die physikalischen Gründe für die ersten Grundlehren der Musik sind, oder mit anderen Worten, in welchem Verhältnisse die Schwingungszahlen der Töne stehen, die in ihrer Aufeinanderfolge oder beim gleichzeitigen Erklingen uns befriedigen. Hierbei wird es nicht zu umgehen sein, daß wir die einfachsten musikalischen Bezeichnungen als bekannt voraussetzen; doch glauben wir, daß wir dies auch getrost thun dürfen, da die Musik jetzt eine so weit verbreitete Kunst ist, daß wohl jeder unserer Leser derselben in irgend welcher Weise nahe getreten ist.

Wir haben früher ausführlicher besprochen, daß eine gespannte Saite entweder ihrer ganzen Länge nach schwingen kann, oder daß sie sich in mehrere gleiche Theile theilt; die Schwingungszahlen der so entstehenden Obertöne verhalten sich dabei, wie die Anzahlen der Abtheilungen, sodaß, während der Grundton 1 Schwingung macht, der nächste Oberton deren 2, der darauf folgende 3 u. s. w. Schwingungen vollbringt. Endlich erwähnten wir, daß man die Saite auch so in Bewegung versetzen kann, daß sie mehrere dieser Schwingungen gleichzeitig ausführt, daß man also außer dem Grundton noch einen oder mehrere Obertöne hört. Aehnliche Bemerkungen wiederholten wir bei den Pfeifen, und auch bei anderen tönenden Werkzeugen läßt sich dieselbe Erscheinung wahrnehmen: durch sie aber erhalten wir einen Schlüssel für die nächste Verwandtschaft der Töne.

Läßt man zwei Saiten schwingen, von denen die eine nur ein bestimmter Bruchtheil der anderen ist, so wird unter den Obertönen der längeren Saite auch der Grundton der kürzeren vorkommen: die kürzere giebt also einen Ton an, der in dem Klange der längeren bereits enthalten ist. Daher erhält unser Ohr durch ihr Schwingen nicht eine ganz neue Tonempfindung, sondern es wird nur eine bereits vorhandene

Digitized by Google

Empfindung dadurch verstärkt. Läßt man also beide Saiten gleichzeitig tönen, so wird dadurch unser Ohr nicht unangenehm berührt werden: die beiden Töne passen zu einander, sie sind harmonische Töne. Wir erhalten daher zu irgend einem Grundtone die ihm nächst verwandten Töne, wenn wir seine Obertöne erklingen lassen; die Reihe dieser Obertöne wollen wir jetzt einer Prüfung unterwerfen.

Den größten Grad von Verwandtschaft zu einem gegebenen Grundtone besitzt demnach sein nächster Oberton, d. h. der Ton, der doppelt soviel Schwingungen macht, als der Grundton, und den wir seine Octave nennen; die Verwandtschaft desselben ist so groß, daß, wenn wir die Töne in der Musik durch Buchstaben bezeichnen, wir für denselben gar keinen neuen Buchstaben einführen, sondern ihn nur als eine Wiederholung des Grundtons ansehen. Der tiefste Ton, der überhaupt in der Musik vorkommt, wird bei sehr großen Orgeln durch offene Holzpfeifen von 32′ Länge hervorgebracht; derselbe macht in der Secunde 16 Doppelschwingungen und wird als Doppel-Contra-C oder durch CII bezeichnet. Seine Octave, das Contra-C der gewöhnlichen Orgeln oder CI, schwingt 32 Mal; hierauf folgt C mit 64, dann c, der tiefste Ton der Tenorstimme mit 128, weiter c′, das eingestrichene c oder der tiefste Ton der Sopranstimme, mit 256 Schwingungen. Ebenso werden die weiteren Octaven durch mehrere Striche bezeichnet, die Schwingungszahlen aber durch weitere Verdoppelung gefunden. Dasselbe, was wir von den Tönen C gesagt haben, gilt ebenso von anderen Tönen, die wir mit D, E u. s. w. bezeichnen: die Schwingungszahl jedes höheren ist das Doppelte der Schwingungszahl des tieferen, der mit demselben Buchstaben bezeichnet wird.

Auf die Octave folgt als nächster Oberton derjenige Ton, der dreimal soviel Schwingungen macht als der Grundton. Beziehen wir diesen Ton auf den vorhergehenden Oberton, so nennen wir ihn die Quinte desselben; heißt der Grundton c, so nennen wir die Quinte g. Während also der Grundton C eine Schwingung macht, vollendet seine Octave c deren 2, die Quinte g in der Octave aber deren 3, sodaß man die Schwingungszahl der Quinte g findet, indem man die Schwingungszahl des nächst vorgehenden Grundtones c mit $^3/_2$ multiplicirt. Wenn daher z. B. c′ 256 Schwingungen macht, so macht g′ 384. Kennt man umgekehrt die Schwingungszahl der Quinte, so kann man die des

Digitized by Google

Grundtons wieder durch Multiplication mit $^2/_3$ finden. So gut, wie nun g die Quinte von c ist, so kann man c selbst wieder als Quinte eines neuen Tones ansehen, den wir mit F bezeichnen. Während also c eine Schwingung vollendet, vollbringt F nur $^2/_3$, die Octave von F oder f daher $^4/_3$ Schwingungen. Diesen Ton f bezeichnet man aber als die Quarte von c: das Verhältniß der Quarte zum Grundton ist also nur eine Umkehrung des Quintenverhältnisses. In der Theorie der Musik bezeichnet man häufig den Grundton als Tonica, die Quinte als Dominante und die Quarte als Subdominante.

Bis hierher reichen die Tonverhältnisse, welche von den Alten allein als harmonische Verhältnisse angesehen wurden, und noch in Musikstücken aus dem Anfange des vorigen Jahrhunderts findet man den Schlußaccord nur aus Grundton und Quinte gebildet, da man alle anderen Töne als nicht harmonische Töne ansah. Die neuere Musik kann sich aber hiermit nicht begnügen, und es ist auch in der That kein Grund einzusehen, warum die Reihe der Obertöne mit der Quinte abgebrochen werden soll, da noch weitere Obertöne in der Regel sehr deutlich wahrnehmbar sind.

Verfolgen wir die Reihe der Obertöne weiter, so treffen wir zunächst auf den Ton, der 4 Mal soviel Schwingungen macht als der Grundton, das ist aber seine zweite Octave, also kein neuer Ton. Dagegen wird der nächste Oberton, der 5 Mal soviel Schwingungen macht, etwas Neues bringen: wir nennen ihn die große Terz in der zweiten Octave und bezeichnen ihn für den Grundton C mit e'. Vergleicht man seine Schwingungszahl mit der des nächst vorhergehenden c, so findet man, daß, während c' 1 Schwingung macht, seine Quarte e' deren $^5/_4$ vollendet. Die genannten Töne c, e und g lassen sich durch Verdoppeln oder Halbiren ihrer Schwingungszahlen in die verschiedensten Octaven verlegen; dabei aber muß das Verhältniß ihrer Schwingungszahlen immer dasselbe bleiben, sodaß sich diese Zahlen für c, e und g verhalten, wie $1 : {}^5/_4 : {}^3/_2$ oder wie $4 : 5 : 6$.

Durch diese Betrachtungen sind wir zu den Tönen gelangt, welche den sogenannten Duraccord bilden, und wir sehen zugleich, daß auch der nächste Oberton, dessen Schwingungszahl 6 Mal so groß ist als die des Grundtons darin mit enthalten ist, indem sich in ihm nur die Quinte wiederholt. So wie auf den Grundton c, läßt sich auf jeden

Digitized by Google

anderen beliebigen Ton ein Duraccord aufbauen, wenn man nur die Schwingungszahl des Grundtons das eine Mal mit $^5/_4$, das andere Mal mit $^3/_2$ multiplicirt.

Aber auch diese 3 Töne können doch nur der allerunvollkommensten Art von Musik, etwa den Stückchen, die ein Postillon bläst oder den Hornsignalen des Militärs genügen. Gehen wir auch nur einen Schritt weiter, etwa zur einfachsten Tanz- oder Marschmusik, so müssen wir das Gebiet der Töne, über die wir verfügen, von Neuem erweitern. Diese Erweiterung geschieht nun nicht dadurch, daß man die weiter folgenden Obertöne zu Hülfe nimmt, sondern dadurch, daß man wieder Duraccorde auf die beiden Töne aufsetzt, die dem Grundtone am nächsten verwandt sind, also auf Quinte und Quarte, damit man vom Grundaccorde nach dem Accorde der Quinte und dem der Quarte ausweichen kann.

Bezeichnen wir die Schwingungszahl von c mit 1, so ist, wie oben erwähnt, die Schwingungszahl von g gleich $^3/_2$, daher die Schwingungszahl der Terz von g, die man h nennt, gleich $^5/_4 \cdot {}^3/_2 = {}^{15}/_8$, und der Quinte von g, oder d', gleich $^3/_2 \cdot {}^3/_2 = {}^9/_4$; legt man letzteren Ton aber eine Octave tiefer, wodurch er in seiner Höhe zwischen c und e fällt und nun d heißt, so ist seine Schwingungszahl $= {}^9/_8$ zu setzen. Da die Schwingungszahl der Quarte f $^4/_3$ betrug, so ist die der Terz a der Quarte $= {}^5/_4 \cdot {}^4/_3 = {}^5/_3$, die der Quinte aber $= {}^3/_2 \cdot {}^4/_3 = 2$, wodurch wir zu dem Tone c' gelangen, wie zu erwarten war. Ordnen wir die genannten Töne nach der Größe der Schwingungszahlen, so erhalten wir folgende Reihe, die wir als C-Dur-Tonleiter bezeichnen:

c	d	e	f	g	a	h	c'
1	$^9/_8$	$^5/_4$	$^4/_3$	$^3/_2$	$^5/_3$	$^{15}/_8$	2.

Multiplicirt man diese Verhältnisse der Schwingungen alle mit 24, so erhält man für die einzelnen Töne der Tonleiter folgende Schwingungszahlen:

c	d	e	f	g	a	h	c'
24	27	30	32	36	40	45	48.

Wenn also eine Reihe von acht Tönen das vorstehende Verhältniß der Schwingungen besitzt, so bilden sie eine reine Dur-Tonleiter, welche als die Grundlage aller Musik anzusehen ist: die einzelnen Töne selbst bezeichnet man, wie wir für einige schon erwähnten, mit den lateinischen

Digitized by Google

Ordinalzahlen, als Prime c, Secunde d, Terz e, Quarte f, Quinte g, Sexte a, Septime h und Octave c'. Will man auf einer gespannten Saite, die in ihrer ganzen Länge c angiebt, diese Töne erklingen lassen, dann muß man sie im umgekehrten Verhältnisse verkürzen; wir erhalten also folgende Uebersicht der Länge, in welcher man die Saite schwingen lassen muß, um die einzelnen Töne zu erhalten, und zwar haben wir diese Länge einmal als einen Bruch der Gesammtlänge, das andere Mal in Millimetern ausgedrückt, indem wir die Gesammtlänge beispielsweise $= 900^{mm}$ setzten:

c	d	e	f	g	a	h	c'
1	$^8/_9$	$^4/_5$	$^3/_4$	$^2/_3$	$^3/_5$	$^8/_{15}$	$^1/_2$
900	800	720	675	600	540	480	450.

Vergleicht man die Schwingungszahlen von je zwei nächstbenachbarten Tönen der Tonleiter, so erhält man folgende Verhältnisse:

c d e f g a h c'

$^9/_8$ $^{10}/_9$ $^{16}/_{15}$ $^9/_8$ $^{10}/_9$ $^9/_8$ $^{16}/_{15}$.

Man sieht, daß es dreierlei Schritte zwischen den einzelnen Tönen giebt; den ersten, zwischen c und d, f und g, a und h, mit dem Schwingungsverhältnisse $^9/_8$, nennt man einen großen ganzen Ton, den zweiten, zwischen d und e, g und a, einen kleinen ganzen Ton, den dritten, zwischen e und f, h und c', einen halben Ton.

Wollte man nun auf einem Tasteninstrumente, z. B. einem Claviere, die C-Dur-Tonleiter ganz genau nach dem strengen Verhältnisse der Schwingungszahlen stimmen, so sieht man, daß, wenn man auf demselben die D-Dur- oder G-Dur-Tonleiter spielen will, man sogleich mit einem falschen Schritte beginnt, nämlich mit einem kleinen ganzen Tone, während doch ein großer ganzer Ton anfangen soll. Es ist daher für die jetzige Musik, die nach keiner Seite hin in ihrer Bewegung gehindert sein will, nothwendig, daß auf Kosten der Reinheit ein Ausgleich in diesen Tonverhältnissen getroffen werde, über den wir uns weiter unten aussprechen werden: vorläufig wollen wir den Unterschied zwischen großen und kleinen ganzen Tönen, die ja eigentlich um $^1/_{80}$ von einander verschieden sind, vernachlässigen und nur von ganzen und halben Tönen reden. Wir sagen also, daß in der Dur-Tonleiter erst zwei ganze, hierauf ein halber, dann drei ganze, und endlich noch ein halber

Digitized by Google

Ton einander folgen. Die Ueberſicht der C-Dur-Tonleiter iſt alſo folgende:

c d e f g a h c

1 1 ½ 1 1 1 ½.

Wenn man nun dieſe Reihenfolge beibehält, ſo kann man zu jedem beliebig gewählten Grundtone in gleicher Weiſe die Dur-Tonleiter conſtruiren. Beginnt man z. B. mit dem Tone g, ſo ſieht man, daß ſchon die Töne, wie ſie die C-Dur-Tonleiter giebt, den Bedingungen genügen, bis auf den letzten, denn dieſe Tonleiter giebt folgende Zwiſchenräume oder Intervalle:

g a h c d e f g

1 1 ½ 1 1 ½ 1.

Der Unterſchied dieſes Schemas gegen das vorige liegt alſo nur in den Zwiſchenräumen zwiſchen e, f und g; daher iſt an Stelle des f ein anderer Ton einzuſetzen, der um einen ganzen Ton höher, als e, aber um einen halben Ton tiefer, als g iſt. Man bezeichnet dieſen Ton bekanntlich durch Vorſetzen eines Kreuzes (♯) und nennt ihn fis. Nunmehr heißt alſo die G-Dur-Tonleiter:

g a h c d e fis g

1 1 ½ 1 1 1 ½,

ſtimmt alſo in ihren Intervallen mit der C-Dur-Tonleiter überein. Geht man nun weiter zur Quinte von g, alſo d, ſo iſt für deren Tonleiter außer dem f auch noch das c zum cis zu erhöhen, alſo noch ein Kreuz mehr einzuführen, und ſo weiter, wenn man immer wieder die Quinte des vorigen Grundtons als neuen Grundton wählt. Iſt man in dieſer Weiſe bis zur Erhöhung von e und h zu eis und his gelangt, ſo erhält man Töne, die von f und c nur wenig verſchieden ſind, und auf den Taſteninſtrumenten überhaupt nicht unterſchieden werden können: auf ſolchen Inſtrumenten dagegen, wo der Ton erſt gebildet werden muß, wie bei der Geige, und ebenſo im Geſange beſteht aber doch noch ein Unterſchied, der bei guter Ausführung der Muſik wohl beachtet wird.

Geht man dagegen vom Grundtone c zur Quarte f über, ſo würden die Töne der C-Dur-Tonleiter folgende Intervalle geben:

f g a h c d e f

1 1 1 ½ 1 1 ½;

die Abweichung liegt alſo in den Tönen a, h, c, und es iſt alſo, um

Digitized by Google

wieder Uebereinstimmung herbeizuführen, der Ton h zu erniedrigen, was durch Vorsetzen eines b geschieht. Der so gebildete Ton heißt selbst b, und giebt nun folgende Uebersicht:

f g a b c d e f
1 1 ½ 1 1 1 ½

Geht man nun wieder zur Quarte b über, so muß eine neue Erniedrigung des Tones e zu es eintreten, und so fort für jeden neuen Schritt. Auch bei diesem Verfahren gelangt man zu Tönen, die anderen, welche man auf anderem Wege gebildet hatte, sehr nahe liegen, z. B. b und ais, es und dis u. s. w., endlich ces und h, fes und e, sodaß dieselben auf Tasteninstrumenten nicht mehr unterschieden werden. Bei der Vielseitigkeit, welche jetzt unsere Musik charakterisirt, ist dieses Verschmelzen der Töne eine Nothwendigkeit geworden. Daß die Reinheit der Tonempfindung dadurch die größte Einbuße erleidet, ist freilich sehr zu bedauern.

Kehren wir wieder zur ursprünglichen C-Dur-Tonleiter zurück, beginnen wir aber die Reihe bei irgend einem anderen Tone und schreiten wir zu dessen oberer Octave fort, so erhalten wir neue Tonleitern, die sowohl in der altgriechischen Musik, als auch in den alten Kirchengesängen Anwendung fanden, deren Existenz aber sich auch vielfach in neueren Compositionen nachweisen läßt. Allgemeine Verbreitung besitzt aber nur noch die mit der Sexte a beginnende, die als Moll bezeichnet wird und folgendermaßen zusammengesetzt ist:

a h c d e f g a
1 ½ 1 1 ½ 1 1.

Da nun unser Ohr zu sehr daran gewöhnt ist, beim Aufsteigen zum Grundton nur einen Schritt von einem halben Tone zu hören, so muß bei der aufsteigenden Tonleiter an Stelle von g der um eine halbe Stufe erhöhte Ton gis, den man Leiteton nennt, genommen werden, sodaß sie nun lautet:

a h c d e f gis a.

In dieser Form finden wir die Molltonleiter nicht selten in der neueren Musik: in früherer Zeit, wo man den Gesang vor der Instrumentalmusik bevorzugte, nahm man an dem Schritte von f bis gis, den man übermäßige Secunde nennt und der beim Singen schwer zu treffen ist, mehr Anstoß, und um ihn zu vermeiden und doch beim Aufsteigen den

Digitized by Google

Leiteton gis nicht aufzugeben, erhöhte man auch noch das f zu fis; beim Absteigen aber hob man beide Erhöhungen wieder auf, da man in diesem Falle den Leiteton nicht braucht, sodaß die Moll-Tonleiter nunmehr aus folgenden Tönen besteht:

auffsteigend a h c d e fis gis a
absteigend a g f e d c h a.

Auch jetzt noch ist diese Form fast gebräuchlicher, als die vorher erwähnte; selbstverständlich ist, daß man auch auf jedem anderen Grundton, als a, in gleicher Weise eine Moll-Tonleiter aufbauen kann, wenn man nur dieselbe Reihenfolge der Intervalle anwendet.

Nun noch einige Worte über den Ausgleich der Tonhöhen. Nehmen wir an, daß wir auf einem Claviere, von c beginnend, die Töne nach reinen Quinten stimmten, daß wir aber, sobald wir in die eingestrichene Octave gelangen, jedesmal den gefundenen Ton um eine Octave erniedrigten, so werden wir die Schwingungszahlen für jede Quinte mit $^3/_2$ multipliciren, beim Herabsteigen um eine Octave aber durch 2 dividiren müssen. Setzen wir die Schwingungszahlen von c = 1, so erhält man die Schwingungszahlen für die anderen Töne nach folgender Uebersicht:

c 1
g $^3/_2$
d' $^9/_4$: d $^9/_8$
a $^{27}/_{16}$
e' $^{81}/_{32}$: e $^{81}/_{64}$
h $^{243}/_{128}$
fis' $^{729}/_{256}$: fis $^{729}/_{512}$
cis' $^{2187}/_{1024}$: cis $^{2187}/_{2048}$
gis $^{6561}/_{4096}$
dis' $^{19683}/_{8192}$: dis $^{19683}/_{16384}$
ais $^{59049}/_{32768}$
eis' $^{177147}/_{65536}$: eis $^{177147}/_{131072}$
his $^{531441}/_{262144}$.

Da wir nun aber zwischen his und c' keinen Unterschied machen können, so erhalten wir auf diese Weise ein c', das mehr als doppelt soviel Schwingungen macht, als c, das also zu hoch ist. Will man die richtige Octave haben, und doch alle Quinten gleichmäßig behandeln, so muß man jede Quinte ein wenig tiefer nehmen, man muß an Stelle

Digitized by Google

des reinen Verhältnisses $^3/_2$ oder 1,5 das etwas kleinere Verhältniß 1,4983 anwenden, welches man als das Verhältniß der temperirten Quinte bezeichnet. Bei Annahme dieser Stimmung oder der gleichschwebenden Temperatur werden daher alle Quinten etwas zu tief: für die Terz aber findet man die Verhältnißzahl 1,2599; dieselbe wird also gegen die reine Terz, deren Verhältniß $^5/_4 = 1{,}25$ ist, etwas zu hoch. Durch dieses Mittel ist es nun der Musik möglich geworden, ohne alle Schranken nach allen Tonarten hin zu moduliren.

§ 2. Optische Untersuchung der Schwingungsverhältnisse.

Wir haben schon verschiedene Methoden erwähnt, durch welche es uns möglich wurde, die Zahl der Schwingungen zu bestimmen, die ein Körper in der Secunde ausführt, sobald er einen Ton von bestimmter Höhe giebt. Wir besprachen das Savart'sche Zahnrad und die Sirene, und weiter das Vibroskop (Fig. 113), bei welchem sich die Schwingungen selbst auf Papier aufzeichneten, sodaß man sowohl ihre Zahl, als auch ihre Weite mit Bequemlichkeit messen konnte. Eine andere Methode, die Schwingungen der tönenden Körper sichtbar zu machen, welche in neuerer Zeit der Physiker Lissajous ersonnen hat, ist zu wichtig und geistreich ausgedacht, als daß wir sie mit Stillschweigen übergehen dürften; denn durch sie wird es, wie wir sehen werden, selbst einem Tauben möglich das Verhältniß der Schwingungszahlen zu bestimmen, und die Reinheit des Zusammenklangs zweier Töne zu beurtheilen.

„Jeder von uns, sagt Lissajous in einem Vortrage, in welchem er diese neue Methode auseinandersetzt, hat gewiß in seinen Kinderjahren einmal einen Span in glühende Kohlen getaucht, selbst auf die Gefahr hin, sein väterliches Haus anzuzünden, und hat dann, indem er verschlungene Linien damit beschrieb, die glänzenden Bahnen bewundert, welche das glühende Ende gleich einem zauberhaften Pinsel, dessen flüchtige Spur sofort verschwindet, in der Luft beschrieb. Dieser Versuch dient der optischen Methode zur Grundlage."

Aus diesem allgemein bekannten Versuche sieht man, daß das Bild eines Gegenstandes in unserem Auge nicht sofort verschwindet, wenn auch der Gegenstand selbst seine Stelle verläßt, denn sonst müßte uns das glühende Ende des Spans immer nur als einzelner Lichtpunkt erscheinen:

Digitized by Google

wir ſehen aber, wenn wir denſelben nur mit genügender Schnelligkeit im Kreiſe herum bewegen, den ganzen Kreis als eine in ſich geſchloſſene, leuchtende Linie. In gleicher Weiſe können wir uns denken, daß, wenn an einem ſchwingenden Körper, z. B. einer Saite, ein leuchtender Punkt angebracht iſt, uns auch der Weg dieſes Punktes in ſeinem vollen Zuſammenhange erſcheinen wird. Liſſajous richtete ſeine Unterſuchungen zunächſt auf Stimmgabeln, deren Zinken ſich nach dem Ende hin ein

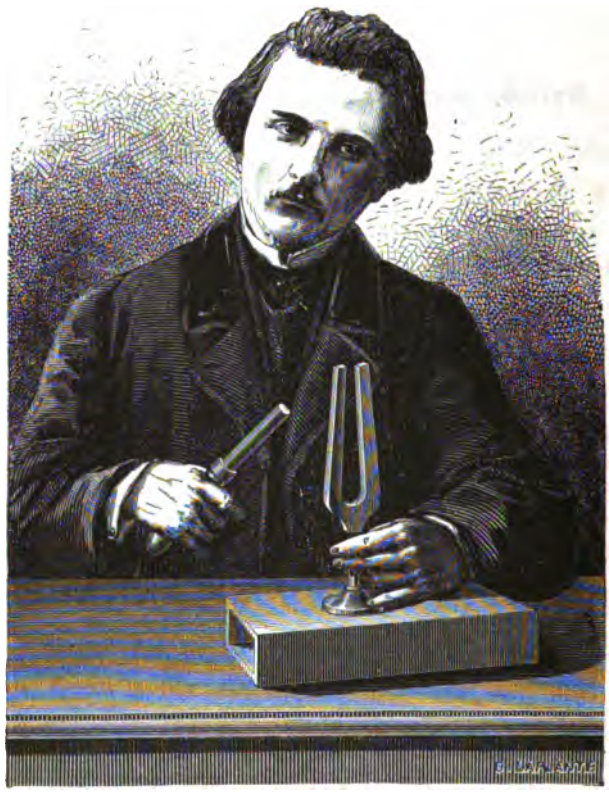


Fig. 133. Stimmgabel auf einem Reſonanzboden.

wenig gegen einander neigten, und die er dadurch zum Tönen brachte, daß er ein Stück Holz, deſſen Durchmeſſer ein wenig größer war als der Abſtand der beiden Zinken, von unten her zwiſchen den Zinken hindurchpreßte (Fig. 133).

An die Außenſeite der einen Zinke befeſtigte er einen kleinen Spiegel und ließ auf denſelben von einer Lampe einen Lichtſtrahl, welcher durch eine enge Oeffnung hindurchgeht, fallen. Stellt man ſich nun ſo, daß

Digitized by Google

VERSITY OF

man den zurückgeworfenen Lichtstrahl mit dem Auge auffängt, so wird man, solange die Stimmgabel in Ruhe ist, nur einen einzigen leuchtenden Punkt sehen: sobald aber die Stimmgabel in Schwingungen versetzt wird, so tritt an Stelle dieses Punktes eine kleine Lichtlinie, deren Richtung mit der Schwingungsrichtung zusammenfällt. Beginnt man nun die Gabel um ihre Axe zu drehen, so sieht man eine leuchtende Wellenlinie, und kann, wenn man die Umdrehungsgeschwindigkeit kennt, aus der Zahl der Wellen, die man sieht, die Zahl der Schwingungen bestimmen. Wendet man in einem sonst dunkeln Zimmer sehr starkes Licht, z. B. das Licht der Sonne oder electrisches Kohlenlicht, zu den Versuchen an, so kann man den zurückgeworfenen Strahl auf einem Schirme auffangen und dadurch die Erscheinung einem ganzen Auditorium gleichzeitig zur Anschauung bringen.

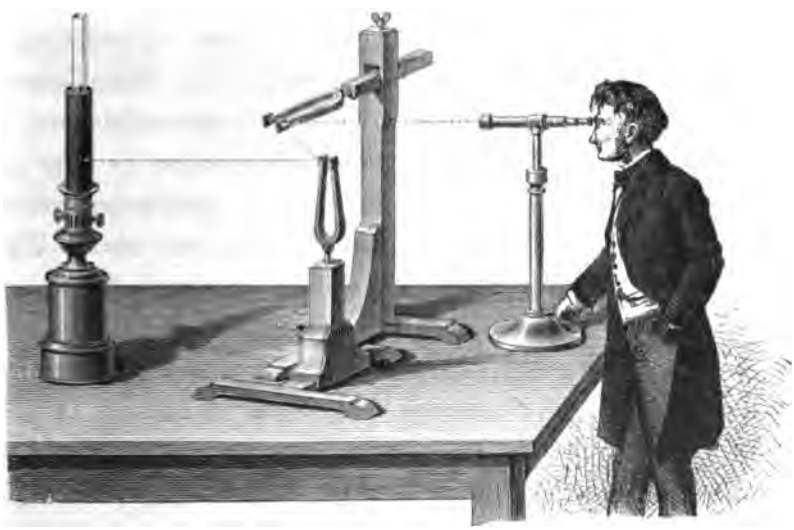


Fig. 134. Optische Untersuchung der Schwingungen.

Auf solche Weise kann man die Schwingungen eines einzelnen tönenden Körpers anschaulich machen: es ist nun aber auch möglich, die Schwingungen zweier solcher Körper zu combiniren. Zu diesem Zwecke läßt man den zurückgeworfenen Strahl wieder auf einen Spiegel fallen, welcher an einer zweiten Stimmgabel befestigt ist (Fig. 134), deren Axe mit der Axe der ersten einen rechten Winkel bildet. Den so zum zweiten Male zurückgeworfenen Strahl beobachtet man entweder direct etwa mit Hülfe eines Fernrohres, oder man fängt ihn wieder auf einem

Digitized by Google

Schirme auf. Sind beide Stimmgabeln in Ruhe, so erscheint nur ein Lichtpunkt; bewegt sich nur die erste, aufrecht stehende Stimmgabel, so erscheint eine senkrechte, bewegt sich nur die zweite, wagerechte Gabel, so erscheint eine horizontale Lichtlinie: schwingen aber beide Gabeln gleichzeitig, so zeigen sich verschlungene Linien, die nach den Schwingungsverhältnissen verschieden sind und von denen wir jetzt einige kennen lernen wollen.

Um die Erklärung deutlich geben zu können, müssen wir auf eine Erscheinung aufmerksam machen und Ausdrücke erwähnen, die wir noch nicht gebraucht haben. Befindet sich irgend ein Körper z. B ein Pendel, in oscillirender Bewegung, so lassen sich bei jeder vollständigen Schwingung vier Hauptlagen desselben unterscheiden, die beständig in derselben Reihenfolge einander ablösen: zuerst befindet es sich in der größten Entfernung nach links, dann in der Mittellage rechts gehend, hierauf ist es am weitesten nach rechts abgelenkt, und endlich kommt es wieder in die Mittellage, aber links gehend, worauf dieselbe Reihe von Neuem beginnt. Diese vier Lagen hat man nun mit den vier Erscheinungsformen des Mondes während eines Umlaufes verglichen und bezeichnet sie daher nach dieser Analogie mit dem Namen der Phasen; die Zwischenzeit zwischen je zwei Phasen ist immer dieselbe, nämlich gleich dem vierten Theile der Dauer einer ganzen Schwingung. Läßt man zwei Pendel von gleicher Länge, welche also gleiche Schwingungsdauer haben, schwingen, so ist der Fall möglich, daß sich beide immer in gleicher Phase befinden, oder es kann auch der Fall eintreten, daß, wenn sich das eine in seiner äußersten Lage links befindet, das andere schon $^1/_8$, $^1/_4$, $^3/_8$, $^1/_2$ u. s. w. Schwingung zurückgelegt hat: man sagt dann, daß der Phasenunterschied $^1/_8$, $^1/_4$, $^3/_8$, $^1/_2$ Schwingung beträgt. Dasselbe, was wir vom Pendel gesagt haben, gilt ebenso von der Wellenbewegung des Wassers, wie auch vom Schwingen der Saiten, Luftsäulen und Stimmgabeln.

Wendet man bei dem Versuche, den Fig. 134 darstellt, und bei welchem die aufrechtstehende Stimmgabel die Oscillationen des Lichtpunktes von unten nach oben, die wagrecht stehende aber die Oscillationen von links nach rechts hervorruft, zwei Stimmgabeln an, welche genau denselben Ton geben, und läßt man dieselben so schwingen, daß sie immer in derselben Phase sich befinden, so wird sich der Lichtpunkt in einer schrägen geraden Linie bewegen; der tiefste Punkt wird zugleich der am

Digitized by Google

weitesten nach links liegende, der höchste der am weitesten nach rechts gerückte sein. Die Lichtlinie ist die Diagonale eines Rechteckes, dessen Seiten gleich den Schwingungsweiten in der horizontalen und verticalen Richtung sind. Befinden sich beide Gabelnaber nicht in derselben Phase, so verwandelt sich die Lichtlinie in eine Ellipse, deren Durchmesser bei einem Phasenunterschiede von $^1/_4$ Schwingung aufrecht ist, sich bei größerem Unterschiede nach links neigt und bei einem Unterschiede von $^1/_2$ Schwingung in eine links geneigte Grade übergeht. Fig. 135 zeigt die Lichtlinien, wie sie bei den beigeschriebenen Phasenunterschieden zu beobachten sind.

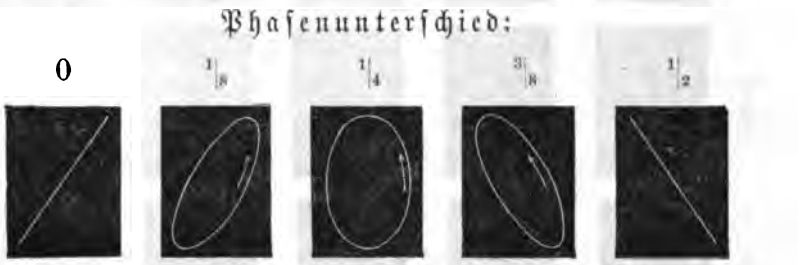


Fig. 135. Curven, welche beim Schwingen zweier Stimmgabeln, die denselben Ton geben, zu beobachten sind.

Befestigt man in dem Apparate an Stelle der horizontalen Stimmgabel eine andere, deren Ton die Octave des Tones der aufrechtstehenden ist, so wird dieselbe 2 Schwingungen machen, während die aufrechtstehende nur eine macht: der Lichtpunkt bewegt sich also in der Zeit, in welcher er einmal auf und ab geht, in horizontaler Richtung zweimal hin und her. In derselben Weise verhalten sich die Schwingungszahlen für die Quinte wie 2 : 3, für die Quarte wie 3 : 4. Die Lichtlinien, welche in diesen Fällen entstehen sind in Fig. 136 abgebildet.

Sind die beiden Stimmgabeln, welche man anwendet, in ganz streng richtiger Stimmung, so wird die Lichtlinie, welche sie zeigen, immer dieselbe Gestalt behalten, so lange sie auch schwingen, und wird nur an Größe abnehmen und sich schließlich auf einen Punkt zusammen ziehen, wenn der Ton allmählich erlischt. Ist dagegen die Stimmung nicht absolut rein, ist z. B. der Ton der Stimmgabel, welche die Octave geben soll, nur ein wenig zu hoch, sodaß selbst das feinste Ohr den Unterschied nicht hört, so wird sich dies doch durch die Lichtlinien bemerklich machen. Denn da diese Gabel etwas vorauseilt, so werden ihre Schwingungsphasen mit denen der anderen Gabel nicht mehr beständig

Digitized by Google

zusammentreffen, sondern der Unterschied der Phase wird immer wachsen. Die Folge hiervon wird sein, daß die Lichtlinie nicht immer dieselbe Gestalt behält, sondern der Reihe nach alle Formen der Fig. 136 durchläuft. Beobachtet man die Zeit, die vergeht, bis genau dieselbe Form

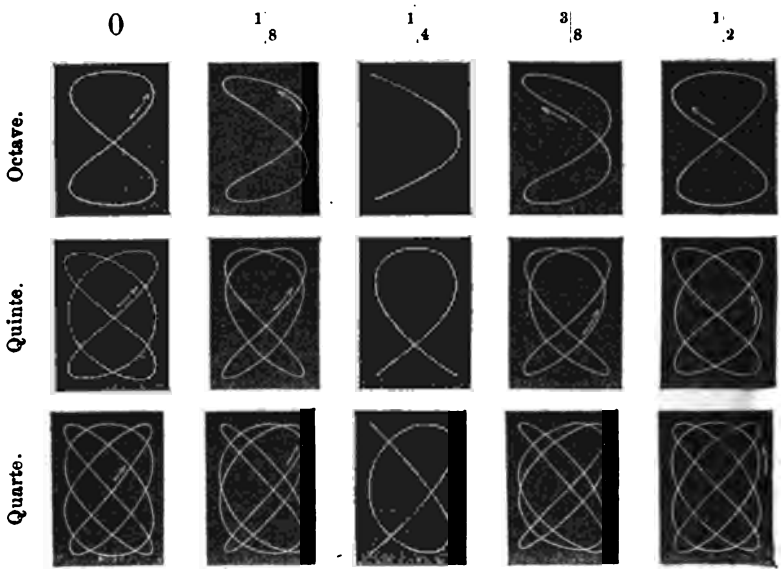


Fig. 136. Curven für die Octave, Quinte und Quarte.

wieder erschienen ist, so weiß man, daß die kleinere Stimmgabel in derselben eine Schwingung mehr gemacht hat, als wenn sie die genaue Octave gäbe.

Man sieht, daß man mit dieser Methode die Schwingungsverhältnisse mit viel größerer Schärfe bestimmen kann, als es dem bestgeübten Ohre durch bloßes Hören möglich sein würde. Hat man z. B. zwei Stimmgabeln, die denselben Ton angeben, und bei denen auch die Lichtlinie immer dieselbe Form behält, so genügt es, daß man die eine ein wenig erwärmt, um sogleich zu bewirken, daß die Lichtlinie der Reihe nach alle Formen der Fig. 135 durchläuft. Der Einklang ist gestört, wenn auch das Ohr davon nichts empfindet.

Auch die Schwingungen einer Luftsäule kann man durch folgendes Mittel, welches in neuerer Zeit König ersonnen hat, sichtbar machen. In der Wand einer offenen Holzpfeife befindet sich eine Reihe Löcher, z. B. eines an der Stelle, wo sich der Knotenpunkt des Grundtones befindet, und zwei andere an Stelle der Knoten der Octave. Vor jeder

Digitized by Google

dieser Oeffnungen, die durch dünne Kautschuckplatten geschlossen sind, befindet sich eine Kapsel, welche in eine mit Brenner versehene Röhre ausläuft. In diese Kapsel läßt man Leuchtgas einströmen, entzündet dasselbe, sodaß es mit kleiner Flamme an jedem Brenner brennt; zugleich wird auch die Kautschuckhaut durch den Gasdruck ein wenig nach dem Innern der Röhre aufgebläht. Sobald nun der Druck in der Röhre wächst, so wird die Kautschuckhaut zusammengedrückt: dadurch wird der innere Raum der Kapsel kleiner, das Gas strömt mit größerer Stärke aus und die Flamme wird länger; umgekehrt verkürzt sich die Flamme, wenn der Druck nachläßt. Man sieht, daß die Länge der Flamme ein sehr gutes Maß für die Stärke des Luftdrucks abgiebt, und aus diesem Grunde hat König dieselben als Manometerflammen bezeichnet.

Fig. 136. Offene Pfeife mit Manometerflammen.

Lassen wir nun aus einem Gebläse Luft in eine Pfeife strömen, an der sich Manometerflammen in der angegebenen Vertheilung befinden, so wird die Luft in Schallschwingungen gerathen und, wenn sie sich dabei an einer Stelle verdichtet, wo sich eine Kapsel befindet, ein stärkeres Aufflackern der Flamme bewirken. Nehmen wir zunächst an, daß die Pfeife so angeblasen wird, daß sie ihren tiefsten Ton giebt, so bildet sich in ihrer Mitte ein Schwingungsknoten: bei jeder Schwingung strömt die Luft einmal von beiden Enden nach der Mitte zu und bildet eine Verdichtung, um sogleich wieder nach beiden Enden abzufließen, sodaß an Stelle der Verdichtung nunmehr eine Verdünnung tritt; im übrigen Theile der Röhre ist die Luft zwar in strömender Bewegung, ohne aber dabei ihre Dichtigkeit wesentlich zu ändern. Die Folge hiervon ist, daß die höchste und die tiefste Flamme ziemlich ruhig brennen, die mittlere dagegen in eine lebhaft flackernde Bewegung geräth; denn sobald sich die Luft in der Mitte der Röhre verdichtet, drückt sie stärker auf die Kautschuckplatte und bewirkt ein stärkeres Ausströmen des Gases und eine Verlängerung der Flamme: bei jeder Verdünnung der Luft dagegen drückt der Gasdruck die Platte in das Innere des Pfeifenkörpers,

Digitized by Google

das Gas strömt weniger stark aus und die Flamme wird kleiner, verlöscht wohl gar, wenn die Bewegung heftig ist. Bei jeder Schwingung zuckt also die Flamme, die sich einem Schwingungsknoten gegenüber befindet, einmal lebhaft auf, um sich darauf sogleich zu verkürzen. Bewirkt man nun durch stärkeres Anblasen, daß die Pfeife nicht mehr ihren tiefsten Ton, sondern den nächst höheren, die Octave, giebt, so wird in der Mitte ein Schwingungsbauch entstehen, d. h. die Luft wird hier lebhaft hin und her fließen, ihre Dichtigkeit wird aber constant die mittlere bleiben: daher bleibt nun die mittlere Manometerflamme in Ruhe. Dagegen bilden sich Knoten in $^1|_4$ und $^3|_4$ der Pfeifenlänge, und die Flammen, welche an diesen Stellen angebracht sind, beginnen nun sich zu strecken und zu verkürzen in demselben Rhythmus, in welchen die Luft schwingt, also doppelt so schnell, als zuvor die mittlere Flamme.

Um dieses Spiel der Flammen anschaulicher zu machen, wendet König eine Projectionsmethode an, die dem Verfahren Lissajous' sehr

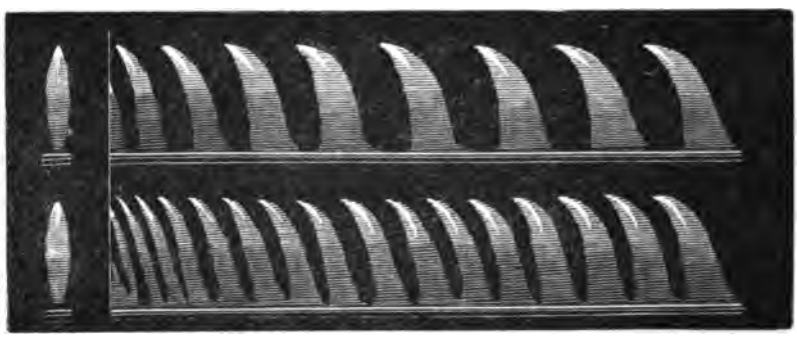


Fig. 138. Manometerflammen für den Grundton und seine Octave.

ähnlich ist. Er stellt nämlich neben der Manometerflamme einen Spiegel auf, den er durch ein Räderwerk in schnelle aber gleichmäßige Umdrehung versetzt. Sobald die Pfeife erklingt, sieht man in diesem Spiegel eine Reihe spitzer Flammen, die durch dunkle Zwischenräume getrennt sind, oder auch einen hellen Streifen, dessen oberer Rand mit gleichen Zähnen in gleichen Abständen gekrönt ist. Bringt man zwischen Flammen und Spiegel eine Sammellinse, so lassen sich sehr deutliche und scharfe Bilder auf einem Schirme auffangen, an denen man die Erscheinung genauer studiren kann.

Läßt man nach einander, wie vorher erwähnt, den Grundton und seine Octave erklingen, so wird sich diese Veränderung in der Tonhöhe

Digitized by Google

in der Weiſe bemerklich machen, wie es in Fig. 138 dargeſtellt iſt, in welcher die obere Reihe das Spiegelbild der Flamme für den Grundton, die untere für die Octave giebt.

Um die Schwingungen zweier Pfeifen mit einander zu vergleichen, verſieht König jede derſelben an ihrem Knotenpunkte mit einer Kapſel, leitet aber das Gas durch Schläuche bis zu zwei Brennern, von denen der eine ſich gerade über dem anderen befindet, ſodaß die Spiegelbilder

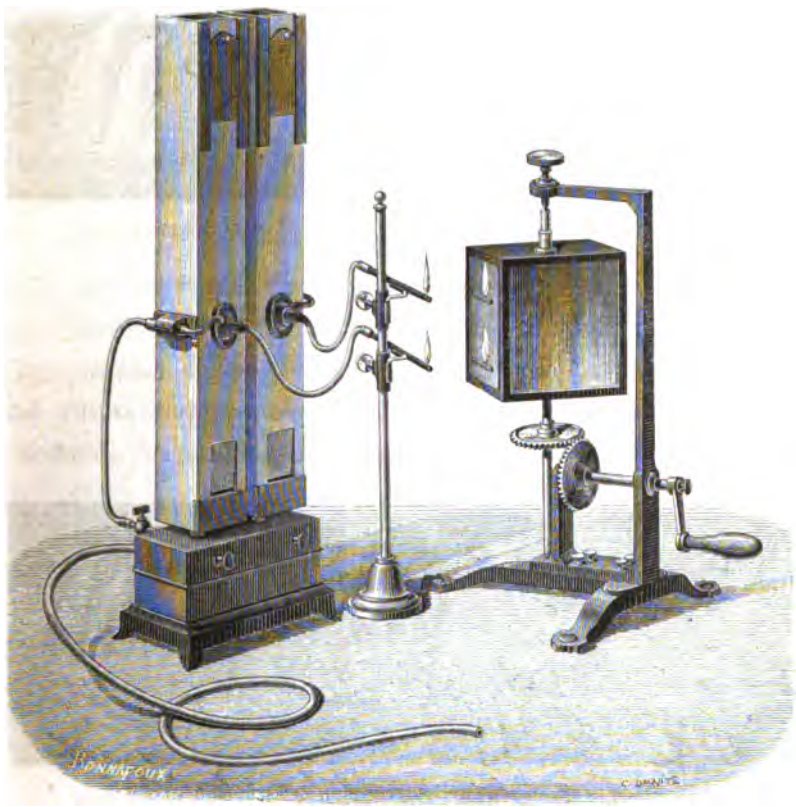


Fig. 139. König's Apparat zur Vergleichung der Schwingungsbewegung zweier Pfeifen.

der Flammen ſenkrecht über einander liegen (Fig. 139). Geben nun beide Pfeifen genau denſelben Ton, ſo werden die Spitzen der Flammenbilder gleichen Abſtand haben, für die Octave ſind die Zwiſchenräume halb ſo groß, für die Quinte kommen auf zwei Spitzen des Grundtones, drei des höheren Tones.

Endlich laſſen ſich die Tonhöhen von Pfeifen, deren Töne harmoniſch ſind, noch dadurch vergleichen, daß man das Gas aus den Kapſeln zu

Digitized by Google

einem gemeinsamen Brenner hinleitet. Läßt man nun beide Pfeifen gleichzeitig erklingen, so wird die Flamme durch die beiden Wellensysteme zugleich erregt: man sieht auf dem Schirme eine Reihe Flammenbilder von verschiedener Länge auf einander folgen, deren Zahl vom Verhältnisse der Schwingungszahlen beider Töne abhängt. So giebt Fig. 140

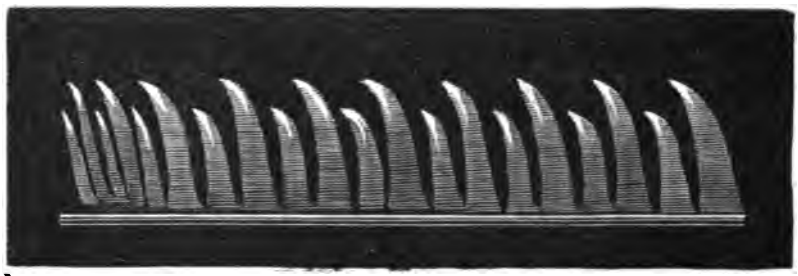


Fig. 140. Manometerflammen, erregt durch Grundton und Octave.

das Bild, das sich zeigt, wenn der Ton der einen Pfeife die Octave des Tones der andern ist: man sieht in derselben abwechselnd größere und kleinere Spitzen, deren Abstände immer dieselben bleiben. „Diese Anordnung, sagt König, ist der vorigen sogar noch vorzuziehen, sobald das Verhältniß der beiden Pfeifen nicht ein vollkommen einfaches ist.

Fig. 141. Manometerflammen, erregt durch Grundton und Terz.

Hat man z. B. eine Pfeife, welche c, und eine zweite, welche die Terz e giebt, so ist es nach der ersten Methode immer schwierig zu beobachten, daß auf vier Spitzen für den ersten Ton fünf für den zweiten kommen; dagegen übersieht man bei der zweiten Anordnung leicht, daß sich Gruppen von fünf, theils längeren, theils kürzeren, Spitzen bilden (Fig. 141).“

Digitized by Google

§ 3. Klangfarbe der Töne.

Wir haben bereits erwähnt, daß sich die Töne, abgesehen von ihrer Höhe und Stärke, noch durch eine weitere Eigenthümlichkeit unterscheiden, die wir als ihre Klangfarbe bezeichnen, und die es uns möglich macht, Töne von einander zu trennen, wenn auch ihre Höhe und ihre Stärke nicht verschieden sind. Das a der Geige hat einen ganz anderen Charakter, als das der Flöte, des Claviers, der Stimmgabel, oder das gesungene a; ja auch durch die verschiedene Art, wie man ein Instrument behandelt, kann man bewirken, daß derselbe Ton doch ganz anders klingt; ob man auf der Geige mit breitem oder schmalem Bogen geigt, ob man das a auf der A-Saite, oder durch Verkürzen auf der D-Saite spielt, giebt dem Ton einen ganz anderen Charakter. Und ebenso weiß man nur zu gut, wie verschieden es klingt, wenn derselbe Ton von verschiedenen Personen gesungen wird: nicht allein, daß der Grad der Schönheit ein sehr verschiedener ist, auch auf die Stimmlage kommt es sehr an, und so macht es einen sehr großen Unterschied, ob ein und derselbe Ton, z. B. c', von einer Baß-, Tenor-, Alt- oder Sopranstimme gesungen wird.

Worin diese Eigenthümlichkeit der Töne ihren Grund hat, darüber war man lange Zeit im Unklaren, und selbst den bedeutendsten Physikern, die sich mit diesem Gegenstande beschäftigten, wie z. B. Euler, gelang es nicht, eine Erklärung zu finden, die sich irgendwie durch Versuche bestätigen ließ. Erst in der letzten Zeit wurde endlich dieses Dunkel gelichtet und die richtige Erklärung des Wesens der Klangfarbe durch Helmholtz gegeben und durch vielfache Versuche bestätigt, die der genannte große Physiker und andere, besonders König, anstellten. Das epochemachende Werk, durch welches die ganze Lehre vom Schalle eine vollständige Umgestaltung erfuhr, ist: Helmholtz, die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik. Braunschweig, 1863.

Giebt eine Saite, eine Pfeife, ein Stab, kurz irgend ein Körper einen Ton, so hört man, wie wir wissen, außer dem Grundtone, dessen Höhe vom Ohre deutlich wahrgenommen wird, noch eine Reihe schwächerer Töne, die Obertöne, die dadurch hervorgerufen werden, daß der tönende

Digitized by Google

Körper außer den Schwingungen, die er in seiner Gesammtheit ausführt, sich noch in Theile theilt, die für sich Schwingungen von doppelter, dreifacher, vierfacher Schwingungszahl und geringerer Schwingungsweite ausführen. Auf diese Weise entstehen die zusammengesetzten Tonempfindungen, die wir als *Klänge* bezeichnen: wir hören bei ihnen am stärksten den Grundton, daneben aber noch schwächere harmonische Obertöne, deren Schwingungszahlen Vielfache der Schwingungszahl des Grundtones sind.

Nicht alle Töne, die wir hören, sind solche zusammengesetzte Klänge: es giebt auch wirklich *einfache Töne*, die frei von allen Obertönen sind; ein solcher einfacher Ton entsteht z. B. wenn man eine Stimmgabel vor einer Röhre schwingen läßt, die angeblasen den Ton der Stimmgabel als Grundton geben würde. „Es sind diese Töne ungemein weich, frei von allem Scharfen und Rauhen; sie scheinen verhältnißmäßig tief zu liegen, sodaß schon die, welche ihrer Tonhöhe nach den tiefen Tönen einer Baßstimme entsprechen, den Eindruck einer ganz besonderen und ungewöhnlichen Tiefe machen; die Klangfarbe solcher tiefen einfachen Töne ist auch ziemlich dumpf. Die einfachen Töne der Sopranlage klingen hell, aber auch die den höchsten Sopratönen entsprechenden sind sehr weich ohne eine Spur von der schneidenden oder gellenden Schärfe, welche diese Töne auf den meisten Instrumenten zeigen, mit Ausnahme etwa der Flöte, deren Klänge den einfachen Tönen ziemlich nahe stehen, indem sie wenige und schwache Obertöne haben. Unter den menschlichen Stimmlauten kommt das U diesen einfachen Tönen am nächsten, doch ist auch dieser Vocal nicht ganz frei von Obertönen. Vergleicht man die Klangfarbe eines solchen einfachen Tones mit der eines zusammengesetzten Klanges, dem sich die niedrigeren harmonischen Obertöne anschließen, so hat der letztere etwas klangvolleres, metallischeres und glänzenderes neben dem einfachen Tone. Selbst schon der Vocal U der menschlichen Stimme, obgleich er unter allen der dumpfeste und klangloseste ist, klingt merklich glänzender und weniger dumpf, als ein gleich hoher einfacher Ton."

„Da die Form einfacher Wellen vollständig gegeben ist, wenn ihre Schwingungsweite gegeben ist, so können einfache Töne nur Unterschiede der Stärke, aber nicht der musikalischen Klangfarbe darbieten. In der That ist der Klang derselben ganz gleich, ob wir nun den Grundton einer Stimmgabel mittelst einer Resonanzröhre aus beliebigem Material,

Digitized by Google

Glas, Metall oder Pappe, oder mittelst einer Saite an die Luft leiten, wenn man dafür sorgt, das nichts an dem Apparate klirren kann*)."

Während somit die einfachen Töne einen hohlen, fast könnte man sagen nüchternen Klang besitzen und deshalb für sich allein in der Musik eine nur beschränkte Verwendung finden können, bilden den Gegensatz dazu die Töne, die von sehr hohen, oder unharmonischen Obertönen, oder auch von unharmonischen Geräuschen begleitet werden. Hierher gehören z. B. die Töne, die man hört, wenn auf einer Glas- oder Metallplatte Chladni'sche Klangfiguren (Fig. 129) erregt werden. Die Empfindung, welche wir bei denselben haben, ist nichts weniger als angenehm, was besonders daher rührt, daß die Obertöne nicht in gleichmäßiger Stärke anhalten, sondern nur immer mit Unterbrechungen und stoßweise auftreten, und dadurch für unser Ohr eine unerträgliche Rauheit besitzen. Musikalisch verwendbar können solche Töne nur dann werden, wenn die begleitenden Obertöne oder Geräusche verhältnißmäßig nur schwach sind und recht gleichmäßig anhalten, wie dies z. B. beim Geräusch, das die ausströmende Luft beim Flötenspiele verursacht, wie auch beim Schmettern der Trompete der Fall ist.

Die größte Verwendung in der Musik finden endlich die Klänge, welche sich von beiden Extremen möglichst fern halten, bei denen also der Grundton von den nächsten Obertönen in vollkommener Reinheit und Klarheit begleitet wird. Welche Obertöne hierbei auftreten, und wie sich ihre Stärke unter einander und zur Stärke des Grundtones verhält, das bestimmt den Charakter, den wir als Klangfarbe bezeichnen; der Phasenunterschied hat auf dieselbe keinen Einfluß. Um die Anwesenheit und Stärke der Obertöne zu erkennen, wendet Helmholtz Instrumente an, die er Resonatoren nennt und die folgende Einrichtung haben. Eine hohle Kugel aus Glas oder Kupferblech endigt auf einer Seite in einem kurzen, offenen Cylinder, auf der anderen in eine ebenfalls offene Spitze, die genau in die Mündung des Gehör-

Fig. 142. Resonator nach Helmholtz.

*) Helmholtz, a. a. O. S. 119. 120.

Digitized by Google

ganges unseres Ohres paßt (Fig. 142). Wird die Luft im Innern des Hohlraumes durch irgend welches Mittel in Schwingungen versetzt, so giebt sie einen Ton von ganz bestimmter Höhe: wenn z. B. der Durchmesser einer Glaskugel 130^{mm} beträgt, der Hohlraum aber einen Inhalt von 1053^{cm} hat, so ist der Ton, auf den sie sozusagen gestimmt ist, c'. Drückt man nun die Spitze in den Gehörgang, so wird die Luft im Hohlraume in lebhafte Schwingung gerathen und dadurch

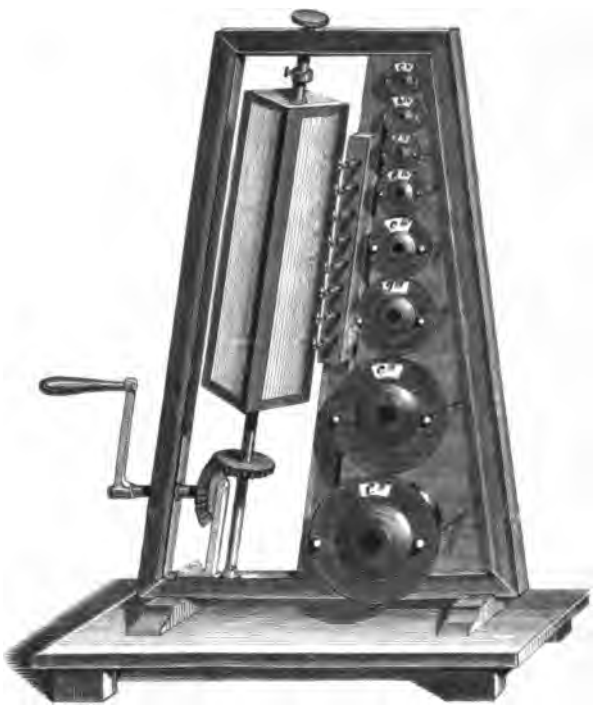


Fig. 143. König's Apparat zur Analyse der Klänge.

stark auf unsern Hörnerv wirken, sobald ein Klang ertönt, der den Ton des Resonators als Oberton oder Partialton enthält: mit Hülfe dieser Apparate macht sich die Anwesenheit bestimmter Töne in einem Klange auch dem ungeübten und weniger feinen Ohre bemerklich. An Stelle der kugelförmigen Resonatoren wendet Helmholtz auch röhrenförmige an, die aus Glas, Metall oder Pappe verfertigt sind: und besonders für tiefe Töne sind dieselben vorzuziehen.

Um diese Beobachtungen vom Gehöre ganz unabhängig zu machen, setzt König die Resonatoren mit Manometerflammen in Verbindung.

Digitized by Google

An einem Stativ sind eine Reihe von Resonatoren über einander befestigt (Fig. 143), welche z. B. auf die Töne c, c', g', c'', e'', g'', b'', c''' gestimmt sind. Hinter jeden derselben, durch eine Kautschuckhaut von ihm getrennt, befindet sich eine Kapsel, durch welche Leuchtgas nach einer Manometerflamme strömt; auch diese Flammen stehen in einer Reihe über einander und einem rotirenden Spiegel gegenüber. Bringt man nun auf irgend einem Instrumente einen Klang hervor, so wird die Luft in denjenigen Resonatoren in Schwingung gerathen, deren Töne in dem Klange enthalten sind. Hierdurch erkennt man die Anwesenheit der Obertöne, und aus der Lebhaftigkeit des Flackerns zugleich auch ihre Stärke. Zugleich läßt sich hierdurch der Beweis führen, daß eine Aenderung der Klangfarbe nur dadurch bewirkt wird, daß andere Obertöne in verschiedener Stärke hervortreten.

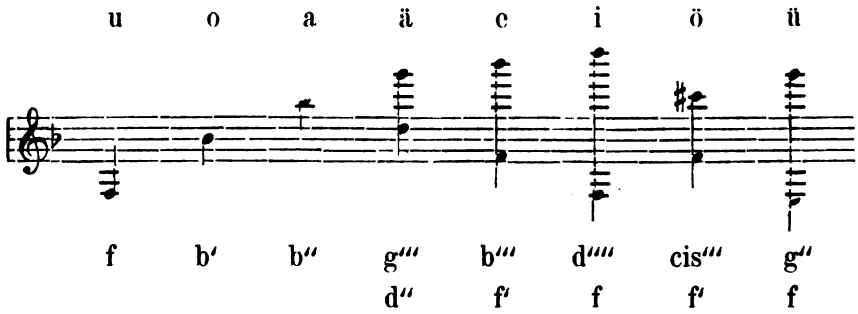
Die Methode, Klänge durch Resonatoren zu analysiren, ist endlich von Helmholtz auf das Studium der menschlichen Sprache angewendet worden: er hat die Existenz harmonischer Obertöne, von denen die ersten sechs bis acht besonders deutlich hervortreten, auch in diesem Falle nachgewiesen und dabei gezeigt, daß die Intensität derselben von der Stellung der Theile des Mundes, also von der verschiedenen Gestalt abhängt, welche die Mundhöhle beim Aussprechen der Vocale annimmt. „Die Tonhöhen stärkster Resonanz der Mundhöhle hängen nur ab von dem Vocale, für dessen Bildung man die Mundtheile zurecht gestellt hat, und ändern sich ziemlich beträchtlich selbst bei kleinen Abänderungen in der Klangfarbe des Vocals, wie sie etwa in verschiedenen Dialecten derselben Sprache vorkommen. Dagegen sind die Eigentöne der Mundhöhle fast unabhängig von Alter und Geschlecht. Ich habe im Allgemeinen dieselben Resonanzen bei Männern, Frauen und Kindern gefunden. Was der kindlichen und weiblichen Mundhöhle an Geräumigkeit abgeht, kann durch engeren Verschluß der Oeffnung leicht ersetzt werden, sodaß die Resonanz doch eben so tief werden kann, wie in der größeren männlichen Mundhöhle*)."

Für jeden Vocal nimmt also die Mundhöhle eine solche Stellung ein, daß, wenn die in ihr enthaltene Luft in Schwingung geräth, sie einen oder mehrere Töne von ganz bestimmter Höhe giebt, welche für

*) Helmholtz, a. a. O. S. 166.

Digitized by Google

die Vocale charakteristisch sind. So ist z. B. b'' der bestimmende Ton für den Vocal a; sprechen wir also ein a in beliebiger Tonhöhe aus, so wird b'' immer mit durchklingen. Wir wollen hier die charakteristischen Töne für die Vocale nach Helmholtz mittheilen, bemerken aber, daß dialectische Verschiedenheiten hierbei von großem Einflusse sind:



Von der Existenz der bestimmenden Töne kann man sich auch noch auf folgende Weise überzeugen. Hält man eine Stimmgabel, die den Ton b'' giebt, während sie schwingt, vor den geöffneten Mund, und spricht man mehrmals nach einander die Vocale a und o mit leiser Stimme aus, so hört man, daß der Ton der Gabel sich ein wenig verstärkt, so oft der Vocal a ausgesprochen wird, während der Vocal o an ihrer Stärke nichts ändert. Derselbe Versuch läßt sich ebenso mit anderen Vocalen anstellen, wenn man Stimmgabeln benutzt, welche die charakteristischen Töne derselben geben.

Wenn die Untersuchungen über diese Gegenstände auch noch zu keinem Abschlusse gelangt sind, so ist doch nun eine Bahn eröffnet, auf der die Männer der Wissenschaft immer weiter vordringen werden.

Viertes Kapitel.

Gehör und Stimme.

§ 1. Das Ohr des Menschen.

Jede Erscheinung der Natur gelangt zu unserem Bewußtsein nur durch die Vermittelung der Organe unseres Körpers, deren Bestimmung es ist, die äußeren Eindrücke aufzunehmen und bis zu dem Punkte weiter zu befördern, der als der eigentliche Sitz alles Denkens angesehen

Digitized by Google

werden muß: diese Organe aber bezeichnen wir als die Sinne; sie allein erhalten von den Vorgängen außer uns die Eindrücke, die wir Empfindungen nennen, und die einfach oder zusammengesetzt sind, je nachdem sie nur auf einen Sinn oder zugleich auf mehrere wirken. So nehmen wir das Licht wahr durch das Sinnesorgan des Gesichtes, die Wärme durch den Gefühlssinn; derselbe Sinn belehrt uns auch darüber, daß die Körper einen Druck ausüben, woraus wir auf die Thätigkeit der Schwerkraft schließen, deren Wirkungen wir andererseits auch wieder beim Falle der Körper durch das Auge wahrnehmen; die Empfindung des Schalles endlich vermittelt das Ohr.

Fragen wir nun, worin die Vorgänge der Natur an und für sich bestehen und nach welchen Gesetzen sie erfolgen, so ist das erste Erforderniß, daß wir von ihnen alles trennen, was durch die Thätigkeit unserer Empfindungsorgane erst hinzugefügt wurde: erst wenn es uns möglich ist, das Wesen der Erscheinungen ganz unabhängig von unserer Wahrnehmung darzustellen, wenn es uns gelingt, von unserer Empfindung vollständig abzusehen, erst dann können wir sagen, daß wir die Erscheinung begriffen haben. Diese Abstraction aber läßt sich nicht mit einem Male ausführen; nur Schritt für Schritt können wir uns jenem Verständnisse nähern, wenn wir in der Art, wie wir ein und dieselbe Erscheinung beobachten, und in der Methode, wie wir sie hervorrufen, möglichst wechseln. Denn bei jeder einzelnen Beobachtung kommt ja immer wieder der eine oder andere unserer Sinne zur Mitwirkung, und somit kann die Wahrheit nur dadurch an das Licht treten, daß sich die einzelnen Wahrnehmungen durch die verschiedenen Sinne gegenseitig controliren, und nur auf diesem Wege gelangen wir zur Vorstellung von den Erscheinungen in ihrer Unabhängigkeit.

Wenden wir diese Ueberlegung auf den Schall an, so können wir sagen, daß wir uns durch die verschiedensten Mittel überzeugt haben, daß derselbe in einer oscillirenden Bewegung der Molecüle elastischer Körper besteht. Während unser Ohr den Ton hörte, sah unser Auge die Rotation der Sirenenscheibe und des Zahnrades, beachtete es die merkwürdigen Linien, welche die Lichtpunkte bei Lissajous' Versuchen mit den Stimmgabeln beschrieben, fühlte unsere Hand das Schwingen der Saiten und Zinken der Stimmgabeln; und endlich erfolgt das Zucken der Manometerflammen ganz ohne Mitwirkung unserer Sinne, und nur

Digitized by Google

erst diese zweite Erscheinung, welche ja selbst erst eine Folge der schwingenden Bewegung des Schalles ist, bedarf der Vermittelung unseres Auges, um zu unserem Bewußtsein zu gelangen. Da uns somit das Wesen des Schalles bekannt ist, so bleibt uns noch die weitere Frage, in welcher Weise die Schallempfindung in unserem Gehörorgan selbst zu Stande kommt; und zu diesem Zwecke wollen wir jetzt die Einrichtung unseres Ohres kennen lernen.

Das Ohr besteht aus einem äußeren und einem inneren Theile: der äußere wieder aus der Ohrmuschel und dem Gehörgang. Die

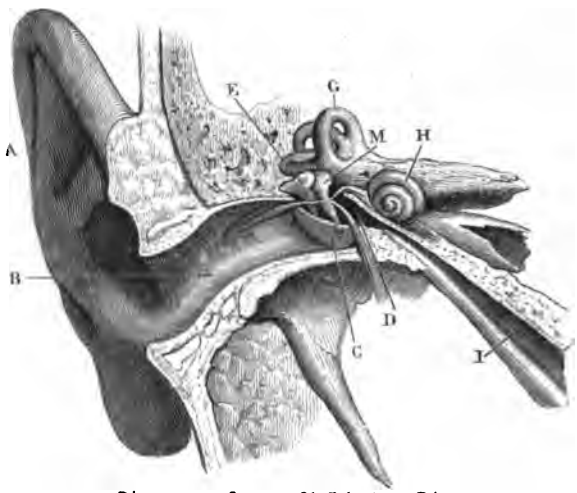


Fig. 144. Innere Ansicht des Ohres.

A Ohrmuschel	M Hammer
B Gehörgang	H Schnecke
C Trommelfell	G Halbkreisförmige Kanäle
D Paukenhöhle	
E Ambos	I Eustachische Röhre.

Ohrmuschel A (Fig. 144) ist eine knorpelige Platte, deren Gestalt sich bei verschiedenen Personen etwas abändert, gewöhnlich aber die Form eines unregelmäßigen Ovales hat, das nach unten etwas schmäler wird. In der Mitte derselben führt eine trichterförmige Oeffnung in den Gehörgang B, eine längliche Röhre, welche in einer gewissen Tiefe durch eine sehr feine, zarte Haut, das Trommelfell C gegen eine zweite Höhle, die sich dahinter befindet, die Paukenhöhle D, abgegrenzt ist. Das Trommelfell hat gegen die Axe des Gehörganges eine ziemlich schräge Stellung, sodaß es bedeutend größer ist, als der Querschnitt dieses Ganges an seinem hinteren Ende. In der Paukenhöhle befinden sich

Digitized by Google

drei Oeffnungen: zwei derselben, welche in der Wand sind, die dem Trommelfell gegenüber steht, werden nach ihrer Gestalt als das runde und ovale Fenster bezeichnet. Eine dritte Oeffnung führt vom unteren Theile der Paukenhöhle in die Eustachische Röhre I, durch welche das innere Ohr mit der Nasenhöhle und dadurch mit der äußeren Luft in Verbindung steht. In der Paukenhöhle liegen zwischen dem Trommelfelle einerseits und dem ovalen Fenster andererseits vier kleine Knochen, die Gehörknöchelchen, deren Anordnung in Fig. 145 dargestellt ist.

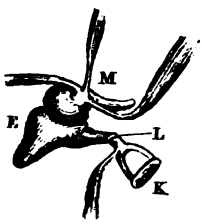


Fig. 145. Gehörknöchelchen.

Fig. 146. Durchschnitt der Schnecke.

An das Trommelfell schließt sich zunächst der Hammer M an, welcher weiter auf den Amboss E drückt. An einer Fortsetzung dieses Amboses befindet sich das linsenförmige Bein L, auf dieses folgt der Steigbügel K, der mit seiner Fläche in das ovale Fenster paßt und auf eine feine Haut drückt, welche dasselbe abschließt. Die Namen dieser Knöchelchen rühren von ihrer Form her. Am Hammer und Steigbügel befinden sich zwei kleine Muskel, durch welche dieselben bewegt und mit größerer oder geringerer Stärke gegen die benachbarten Häute angedrückt werden.

Hinter der Paukenhöhle, die selbst den mittleren Theil des Ohres bildet, befindet sich das innere Ohr oder das Labyrinth, in welchem der eigentliche Proceß des Hörens vor sich geht; daher ist auch dieser Theil durch die härtesten Knochen des Schläfenbeines, durch das sogenannte Felsenbein, geschützt. Das Labyrinth zerfällt in drei Abtheilungen: in der Mitte befindet sich der Vorhof, im oberen Theile die drei halbkreisförmigen Kanäle G, im unteren die Schnecke H. Die ganze innere Höhlung, welche mit einer zähen Flüssigkeit, dem Gehörwasser, erfüllt ist, ist mit einer Haut bekleidet, in der sich der Hörnerv verzweigt, welcher aus dem Gehirn durch einen Kanal, den inneren Gehörgang, eintritt.

Digitized by Google

Dies sind die wesentlichsten Theile, welche das Ohr des Menschen bilden: auch das Ohr der höheren Thiere ist ähnlich eingerichtet, steigen wir aber in der Reihe der Thiere abwärts, so sehen wir, daß zuerst das äußere, dann das mittlere Ohr verschwindet; je einfacher aber dasselbe wird, desto entwickelter sind die übrig bleibenden Theile. Sehen wir nunmehr, welchen Antheil die einzelnen Partieen an dem Vorgange des Hörens nehmen.

Es ist augenscheinlich, daß die Ohrmuschel die Aufgabe hat, die Schallschwingungen zu sammeln und in das Innere des Gehörganges zu leiten: so sieht man, daß diejenigen Thiere, deren Ohrmuschel beweglich ist, die Oeffnung derselben immer nach der Seite kehren, von welcher der Schall kommt, sobald ihre Aufmerksamkeit einmal erregt ist. Dem menschlichen Ohre geht diese Beweglichkeit ab; allein man hat auch hier beobachtet, daß diejenigen Personen in der Regel das feinste Gehör haben, deren Ohren am weitesten vom Kopfe abstehen, und es ist bekannt, daß zum besseren Hören eine Vergrößerung der Ohrmuschel durch Anlegen der hohlen Hand von Vortheil ist. Die Schallschwingungen verbreiten sich weiter durch den Gehörgang, erschüttern das Trommelfell und werden endlich durch die Gehörknöchelchen in das innere Ohr übertragen*). Die Eustachische Röhre führt immer frische Luft der Paukenhöhle zu und erhält den Luftdruck im Innern auf derselben Höhe, wie außerhalb derselben. Sie ist für die Sicherung des Trommelfells gegen sehr starke Stöße von der größten Wichtigkeit: wenn z. B. die Erschütterung der Luft, die beim Abschießen einer Kanone entsteht, nur von einer Seite gegen das Trommelfell stieße, so würde sie dasselbe unbedingt zerreißen; da dieser Stoß aber gleichzeitig von Außen durch den Gehörgang und von Innen durch die Eustachische Röhre erfolgt, so ist die Gefahr der Verletzung des Trommelfells eine viel geringere. Aus diesem Grunde wird den angehenden Artilleristen das Oeffnen des Mundes beim Abschießen der Kanone empfohlen.

Die weitere Uebertragung des Schalles erfolgt durch die Gehör-

*) Die festen Theile des Kopfes, die Zähne und Knochen, leiten die Schallschwingungen unmittelbar in das innere Ohr. Verstopft man sich die Ohren und faßt man mit den Zähnen einen Faden, an welchem eine Glocke hängt, so hört man den Ton derselben durch Vermittlung des Fadens, der Zähne und der Schädelknochen. Schwerhörige, deren Uebel in einer fehlerhaften Constitution der äußeren Theile des Ohres liegt, können auf solche Weise hören.

Digitized by Google

knöchelchen, welche dazu viel geeigneter sind, als es eine Gasmasse sein würde; außerdem scheinen sie aber auch noch die weitere Bestimmung zu haben, daß sie sowohl das Trommelfell, als auch die Haut, die das ovale Fenster abschließt, etwas straffer anspannen und dadurch für die Schallbewegungen empfindlicher machen. Hierauf beruht der Unterschied, den die Sprache durch die Worte hören und horchen bezeichnet: wer nur hört, hat eine schwächere Schallempfindung, weil er die beiden Häute nicht in genügender Spannung erhält: wer dagegen horchen will, setzt, ohne es selbst zu wissen, die Muskeln, die zum Hammer und Steigbügel führen in Thätigkeit, und spannt dadurch die Häutchen straffer an, wodurch der Schall stärker und deutlicher erscheint. Auch nach der Höhe der Töne, welche man hört, scheint sich die Spannung des Trommelfells zu ändern, indem dasselbe für hohe Töne straffer zu sein scheint, als für tiefe.

Wir haben schon oben bemerkt, daß das Labyrinth der wesentlichste Theil des Ohres ist: und in der That können das Trommelfell und die Gehörknöchelchen fehlen, ohne daß vollständige Taubheit eintritt, vorausgesetzt, daß nur die Häutchen, welche das ovale Fenster und ebenso auch das kreisrunde Fenster abschließen, unverletzt sind. Sobald dagegen eines dieser Häutchen fehlt, so fließt das Gehörwasser aus, der Gehörnerv wird blosgelegt und verliert dadurch seine Empfindlichkeit: vollständige Taubheit ist dann die unausbleibliche Folge. Im Vorhofe theilt sich der Hörnerv in zwei Aeste, von denen sich der eine in den drei halbkreisförmigen Gängen, der andere in der Schnecke weiter verzweigt. Der letztere endigt in ungefähr 3000 feinen Fäden von verschiedener Stärke und Länge, den Corti'schen Fasern, welche nach Helmholtz die Klänge in ihre Einzeltöne zerlegen, indem jede nur bei dem Tone schwingt, auf den sie nach ihrer Elasticität und ihren Dimensionen gestimmt ist. Durch dieses Schwingen der Corti'schen Fasern wird also dem Gehirn die Wahrnehmung des Grundtones und der Obertöne übermittelt.

So viele Punkte auch in der Theorie des Hörens noch unklar sind, so müssen wir doch eingestehen, daß dieselbe in den letzten Jahrzehnten sehr wesentlich gefördert ist; und somit dürfen wir auch hoffen, daß durch die fortgesetzten Bemühungen der Physiologen die noch vorhandenen Zweifel gelöst werden. Was uns aber bei den Vorgängen des Hörens

Digitized by Google

am meisten in Verwunderung versetzt, das ist die unendliche Mannigfaltigkeit der Wahrnehmungen, deren unser Ohr fähig ist. Nur durch diesen Umstand, daß der Gehörsinn für die feinsten Nüancirungen der Laute in zahlloser Fülle empfänglich ist, erlangt er die Wichtigkeit für unser ganzes Seelenleben, wird er zum Vermittler des gesammten geistigen Lebens, sowohl der Welt der Gedanken, als auch der Gefühle. Für den Austausch dieses Lebens ist aber als zweiter Theil der Brücke die Gabe der Mittheilung, die Sprache, erforderlich; und so wollen wir uns jetzt zu den Werkzeugen wenden, die diesem Vermögen dienen.

§ 2. Die Sprachwerkzeuge des Menschen.

Wir wollen dieses Buch mit einer kurzen Beschreibung des Sprachorgans des Menschen abschließen, dieses wunderbaren, von der Natur uns verliehenen Instrumentes, durch das es uns möglich wird, unsere innersten Gefühle und Gedanken in ihren feinsten Abstufungen mitzutheilen. Vergleichen wir mit diesem Werkzeuge die vollendetsten musikalischen Instrumente, welche die menschliche Kunst angefertigt hat, so finden wir darunter nicht eines, welches so verschiedenartige Nüancen der Klangfarbe, so mannigfache Articulationen der Laute hervorzubringen im Stande wäre. Zwar ist es gelungen, Maschinen zu construiren, welche Worte hervorbringen, aber wenn diese künstliche Sprache auch allenfalls verstanden werden kann, so fehlt ihr doch jede Abstufung des Tonfalles, durch den das menschliche Wort erst Leben bekommt.

Man vergleicht das Stimmorgan des Menschen gewöhnlich mit einem Blasinstrumente, indem man beachtet, daß der Ton zunächst durch das Schwingen einer Luftsäule gebildet wird, welche in einer oben theilweise geschlossenen Röhre enthalten ist. In diese Röhre, die Luftröhre N, (Fig. 147) dringt die Luft aus den beiden Lungenflügeln durch die beiden Aeste der Luftröhre oder Bronchien, strömt dann durch den Kehlkopf M, der durch die Stellung seiner einzelnen Theile die Höhe des Tones bestimmt, in den Schlund oder die Rachenhöhle, und gelangt endlich durch die Mund- und Nasenhöhle, welche dazu dienen, den Schall zu verstärken und seine Klangfarbe abzuändern, auch wohl ihn mit gewissen Geräuschen zu versehen, in den umgebenden Raum.

Der Kehlkopf, welcher das obere Ende der Luftröhre bildet, erhält

Digitized by Google

seine Gestalt und Festigkeit hauptsächlich durch zwei Knorpel, den Ringknorpel, der seine Basis ausmacht, und den Schildknorpel, der auch äußerlich an der vorderen Fläche des Halses als feste Anschwellung erscheint; er wird von Oben her durch eine Art Klappe, den Kehldeckel E geschützt, welcher verhindert, daß Speisen in die Luftröhre eindringen und Störungen der Sprache oder gar Erstickung herbeiführen können. Im Innern des Kehlkopfes befinden sich zwei zarte Häute, die Stimmbänder I, welche durch zwei kleine Knorpel, die Gießkannenknorpel, gehalten und angespannt werden, und einen Spalt, die Stimmritze K zwischen sich frei lassen, welcher sich je nach Bedürfniß erweitert und verengert; auch etwas höher sind zwei ähnliche Häute, die oberen Bänder H, welche aber einander nicht so nahe stehen, als die Stimmbänder.

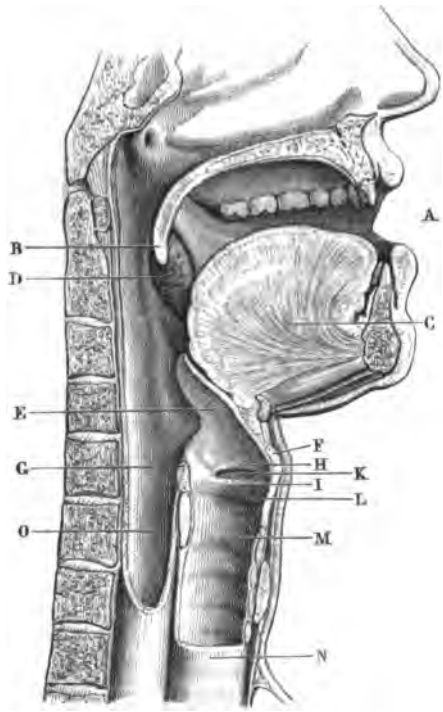


Fig. 147. Sprachorgan des Menschen. Durchschnitt des Kehlkopfes M.

E Kehldeckel. I Stimmbänder
H Obere Bänder. K Stimmritze
N Luftröhre.

Früher glaubte man, daß die Stimmbänder durch ihre Schwingungen die Tonerscheinungen hervorriefen: spätere Untersuchungen aber haben diese Ansicht dahin berichtigt, daß der Kehlkopf mit seinen Theilen nur wie das Mundstück einer Zungenpfeife oder einer Clarinette wirkt, daß aber das eigentlich Tönende die Luftsäule in der Luftröhre ist. Verläßt der Ton den Kehlkopf, so ist seine Höhe schon fest bestimmt, und die Mundtheile können durch ihre Stellung nur noch seine Klangfarbe verändern und das Ausströmen der Luft am Gaumen, wie beim r, h und ch, an den Zähnen, wie beim s, an den Lippen, wie beim f, v und w, durch die Nase, wie beim ng hörbar machen, oder Knalllaute

Digitized by Google

hinzufügen, wie bei d, t, b, p, g und k. Einen vollständigen oder theilweisen Abschluß erhält die Mundhöhle beim m an den Lippen, beim n an den Zähnen und beim l am Gaumen. Die Klangfarbe der Vocale wird dadurch bewirkt, daß man der Mundhöhle verschiedene Gestalt giebt: und zwar besitzt dieselbe beim a die einfachste Form, weshalb man beim Singen ohne Text stets den Vocal a singt; beim o und u verlängert sich die Höhle, beim e und i dagegen wird sie breiter und zugleich bildet die Zunge eine Scheidewand und theilt die Höhle in zwei Abtheilungen. Die Höhe der Stimme verschiedener Personen richtet sich endlich nach der Weite des Kehlkopfes und der Stimmritze, welche bei Männern viel umfangreicher sind, als bei Frauen und Kindern, und durch ihr plötzliches Wachsen beim Uebergang aus dem Knaben- in das Jünglingsalter die Erscheinung bewirken, die man als das Brechen der Stimme oder die Mutation bezeichnet.

Digitized by Google

Drittes Buch.

Das Licht.

Erstes Kapitel.

Die Quellen des Lichtes.

§ 1. Allgemeine Erscheinungen.

Wenn das Reich des Schalles unserem gesammten seelischen Leben die nothwendige Nahrung darbietet, wenn es die besten Mittel giebt, durch welche der Mensch dem Menschen seine Gedanken, seine Gefühle offenbaren kann: so ist es andererseits das Reich des Lichtes, durch welche uns alle Schönheit, alle Herrlichkeit der Welt kund wird und sich in ihrer Pracht erschließt. Und so, wie das Ohr bis weit in das Innere der festesten Schädelknochen hineinreicht, während sich das Auge in seinen Theilen mehr an der Oberfläche hält, so kann man den Sinn des Gehörs den innerlichsten, den Sinn des Auges als den mehr äußeren, der aber das All umfaßt, bezeichnen. Doch nicht allein die Außenwelt eröffnet uns das Licht: auch für unser ganzes Leben, wie überhaupt für das Gedeihen der organischen Natur, ist es eine nothwendige Bedingung. Nach dem Lichte kehrt sich die Pflanze, sendet sie ihre Keime, während sie in der Dunkelheit allmählich verkümmert: und wir selbst fühlen unsere Lebensgeister erwachen, wenn die Nacht vergangen, der Tag aber herbeigekommen ist.

Und alles Licht des Tages, so mannigfache Erscheinungen es auch herbeiführt, entströmt einer einzigen Quelle, deren Kraft aber so gewaltig ist, daß unser Auge ihre unmittelbare Einwirkung nicht zu ertragen

Digitized by Google

vermag; geblendet wendet es sich von der Sonne hinweg, wenn dieselbe, durch keinen Wolkenschleier verhüllt, vom Firmamente strahlt, und selbst die ihr nächstliegenden Theile des Himmels senden uns eine noch zu große Fülle des Lichtes, als daß wir sie ruhig anblicken könnten. Wie anders dagegen, wenn das Licht der Sonne erst die Körper, die uns umgeben, getroffen hat, und von ihnen zurückgeworfen in unser Auge gelangt: es hat nicht allein an Kraft soviel eingebüßt, daß es nun auf unser Auge nicht mehr einen schmerzhaften Eindruck macht, es hat auch eine andere sehr merkwürdige und wesentliche Aenderung erfahren. Das directe Sonnenlicht ist scheinbar einfach, es besitzt nur eine einzige Farbe: wird es dagegen von den Körpern zurückgeworfen, dann zeigt es eine Menge von Abstufungen, eine Verschiedenheit der Färbung, die man in ihm nicht erwarten konnte. Wir sind an diese Aenderung so sehr gewöhnt, daß wir sie in der Regel gar nicht beachten: jeder Körper scheint uns von Natur an und für sich eine Farbe zu besitzen, und wir sind gewöhnlich der Meinung, daß irgend eine Lichtquelle weiter nichts bewirkt, als daß sie diese, dem Körper anhaftende, Eigenthümlichkeit uns wahrnehmbar macht.

Diese vielfachen Nüancirungen des Lichtes und der Farbe werden noch durch die Veränderlichkeit im Zustande der Atmosphäre bedeutend erhöht. Sinkt der Sonnenball unter dem Horizont hinab, dann wird das Licht allmählich matter und die Farben verbleichen immer mehr: immer aber behalten sie ihren eigenthümlichen Reiz, wenn nur der Mond oder die Sterne ihnen ihr spärliches Licht leihen.

Licht und Farben üben schon an sich selbst auf unser Auge einen eigenthümlichen Zauber aus, sodaß mancher Künstler schon in den Fehler verfallen ist, sie selbst als Gegenstände seiner Darstellung zu wählen und die Zeichnung darüber zu vernachlässigen, in gleicher Weise wie in der heutigen Musik der Glanz der Klangfarbe die Klarheit der Melodie überwuchert. Doch wenn wir uns nur an der Schönheit der Farben ergötzen wollen, dann ist es wahrlich nicht nöthig, erst in die Museen zu gehen und die Bilder Rembrandt's, Claude Lorrain's und anderer Meister in der Behandlung der Farbentöne zu bewundern: die Natur selbst bietet uns des Glanzes genug, wenn wir sie nur zu beobachten verstehen. Ein Sonnenstrahl, der durch ein Glas Wasser gebrochen wird, die Röthe, welche des Morgens und Abends den Himmel bedeckt, die glän-

Digitized by Google

zenden Thautropfen an den Spitzen der Gräser, die herrlichen Farben einer Seifenblase, und viele andere Erscheinungen können dem Künstler als geeignete Vorlagen für die Mischung seiner Farben dienen, so wie sie dem denkenden Menschen tausendfache Anregung geben, um sich in die Geheimnisse der Natur zu versenken.

Welch' Wunder, daß beim Anblick dieser Zauber die Naturvölker in ihrer naiven Unbefangenheit die tiefste Ehrfurcht vor der Sonne empfanden, die ihnen die größten Wohlthaten, Licht und Wärme, gewährt, daß sie dieselbe für ein höheres Wesen ansahen und als den höchsten Gott des Weltalls verehrten.

Mit geringerem Respect, aber größerem Verständniß, hat die Wissenschaft den Geheimnissen der Lichterscheinungen nachgeforscht, und durch feine und fleißige Untersuchungen ist es ihr gelungen, die Gesetze, die das Licht bei seiner Ausbreitung befolgt, zu erforschen, ja sogar das Wesen desselben zu ergründen. Mit diesen Gesetzen wollen wir uns jetzt beschäftigen, nachdem wir zuvor die wichtigsten Quellen des Lichtes kennen gelernt haben.

§ 2. Quellen des Lichtes.

Man kann die Quellen des Lichtes nach ihrem Ursprunge in zwei Klassen theilen: die einen befinden sich fern von der Erde im Weltenraume, die andern, uns zugänglichen, sind an der Oberfläche unseres Planeten oder in seiner atmosphärischen Hülle. Zu der ersten Klasse gehört die stärkste unter allen, die Sonne, deren Glanz nach Wollaston den des Vollmondes 800000 Mal übertrifft. Vergleichen wir damit die Stärke des Lichtes, das uns der hellste Fixstern des Himmels, der Sirius, sendet, dessen Licht nur den 7000. Theil des Mondlichtes beträgt, so kommen wir zu dem Resultate, daß 5600 Millionen solcher Sterne erforderlich wären, um der Erde dasselbe Licht zu liefern, welches sie von der Sonne empfängt.

Durch die Axendrehung und den Umlauf der Erde wird das Licht der Sonne in periodischem Wechsel auf die verschiedenen Punkte der Erdoberfläche vertheilt: daher ändert sich die Intensität desselben nach der Jahreszeit und nach der Stunde des Tages. Im Allgemeinen ist die Stärke des Sonnenglanzes von der Höhe abhängig, in welcher sich die

Digitized by Google

Sonne, scheinbar über dem Horizonte befindet; allein auch die Anwesenheit von Dunstmassen in Form von Nebel oder Wolken sind auf die Lichtstärke von großem Einflusse und schwächen sie bedeutend ab.

Noch ehe die Sonne scheinbar sich über dem Horizonte erhoben hat und ebenso, nachdem sie hinabgesunken ist, erhalten wir von ihr Licht: denn in diesen Fällen erleuchtet sie die oberen Luftschichten, welche uns die Strahlen, die sie von der Sonne empfangen, herabsenden. Man bezeichnet diese Erscheinung als Dämmerung: ihre Dauer richtet sich danach, ob sich die Sonne unter einem mehr schrägen oder steilen Winkel gegen den Horizont bewegt; auch durch die Erscheinung der Strahlenbrechung, von welcher wir bald sprechen werden, wird die Dämmerung verlängert.

Unter den leuchtenden Körpern am Himmelsgewölbe giebt es einige, welche uns nicht eigenes, sondern von anderen Quellen entlehntes Licht senden: so empfängt die Scheibe des Mondes, welche unsere Nächte von Zeit zu Zeit so lebhaft erhellt, ihr Licht von der Sonne und sendet diese Strahlen erst zur Erde, dasselbe gilt von allen Planeten und ihren Trabanten. Die Tausende von Sternen dagegen, welche wir in hellen Nächten am Himmel glänzen sehen, senden uns, ähnlich wie die Sonne, ihr eigenes Licht, welches nur durch die ungeheure Entfernung, aus der es strahlt, an Kraft verloren hat. Ebenso sind die Nebelflecke und zum Theil auch die Kometen wirkliche Quellen des Lichtes.

Die Lichtquellen, die auf der Oberfläche unserer Erde selbst ihren Ursprung haben, kann man in natürliche und künstliche theilen. Zu den ersteren gehört der Blitz und das Feuer beim Ausbruche der Vulcane, die Nordlichter, die sich so häufig in den Polargegenden zeigen, und endlich die Sternschnuppen und Feuerkugeln. Auch kann man hierher das Licht rechnen, welches manche Thiere, wie die Johanneswürmchen und viele Meeresthiere, wie auch manche Pflanzen und Mineralien, sowie endlich in Fäulniß übergehende organische Stoffe aussenden. Auf künstliche Weise erregt man Licht durch den Vorgang der Verbrennung, der selbst ein chemischer Proceß ist; das stärkste künstliche Licht, das sich sogar mit dem Sonnenlichte vergleichen läßt, wird dadurch erzeugt, daß ein electrischer Strom zwischen zwei Kohlenspitzen überfließt. Die meisten irdischen Körper aber senden uns Licht, welches sie selbst erst von anderen Lichtquellen entlehnt haben: an und für sich sind sie dunkel.

Digitized by Google

Zweites Kapitel.

Ausbreitung des Lichtes in gleichartigen Mitteln.

§ 1. Geradlinige Ausbreitung des Lichtes.

Wenn sich der Schall von einem Punkte aus weiter verbreiten soll, so bedarf er eines Stoffes, der ihn weiter trägt, und niemals verbreitet er sich durch einen luftleeren Raum. Anders das Licht: eines Stoffes, in dem gewöhnlichen Sinne des Wortes, bedarf dasselbe nicht, sondern es durchdringt in gleicher Weise den Raum, der sich zwischen den einzelnen Gestirnen befindet, wie auch die Leere über dem Quecksilber in der Barometerröhre und die Recipienten, aus denen durch die Luftpumpe die Luft entfernt ist. In gleicher Weise breitet sich aber auch das Licht in der Luft und anderen Gasen, im Wasser und vielen anderen Flüssigkeiten, und endlich in manchen festen Körpern, wie dem Glase, aus.

Trifft das Licht, das von einer Quelle ausströmt, auf einen an und für sich dunkeln Körper, so wird es von ihm gewöhnlich, wenn auch modificirt, zurückgeworfen: der Körper selbst wird also zu einer, wenn auch nur secundären Quelle des Lichtes. Viele Körper lassen aber auch das Licht in mehr oder weniger vollkommenem Grade durch und werden dann durchsichtig genannt.

Durchsichtigkeit einerseits und Undurchsichtigkeit andererseits, kommen nie in absoluter Vollkommenheit vor: auch von dem Lichte, welches durch die durchsichtigsten Massen, wie durch die Luft, das Wasser, das Glas, hindurch geht, wird immer ein Theil absorbirt, welcher um so größer ist, je dicker die Schicht ist, welche das Licht durchdringen muß. Eine Glasplatte oder eine Wasserschicht von geringer Dicke lassen die Gegenstände in großer Schärfe erkennen: sowie aber die Dicke wächst, nimmt die Deutlichkeit ab. Zugleich auch nimmt das Mittel, welches zuerst ganz farblos erschien, eine immer sattere Färbung an, bis endlich die Absorption des Lichtes vollständig wird und nur noch das Mittel, welches zwischen dem Gegenstande und unserem Auge liegt, von uns wahrzunehmen ist. Um dies durch Versuche zu bestätigen tauchte Cialdi in der Nähe der Küste bei Civita Vecchia, wo das Wasser von außerordentlicher Reinheit war, eine weiße Scheibe in das Meer und beobachtete,

Digitized by Google

daß dieselbe in einer Tiefe von höchstens 45m verschwand. „Die Farbe der Scheibe wurde zuerst grünlich, verwandelte sich dann in ein klares Blau, welches ganz allmählich in dem Maße dunkler wurde, wie man den Apparat weiter einsinken ließ, bis man ihre Farbe von der des umgebenden Mittels nicht mehr unterscheiden konnte.“ Scheiben von gelber Farbe oder von der Farbe des Meerschlammes verschwanden unter gleichen Bedingungen schon in der Tiefe von 17 und 24m.

Die Durchsichtigkeit der Gase und der atmosphärischen Luft, wenn dieselbe sehr rein ist, ist bedeutend größer, sodaß das Auge bei klarem Wetter auf sehr hohen Bergen eine weit ausgedehnte Fernsicht genießt und die Gegenstände noch in bedeutender Entfernung unterscheidet. Nach Martins würde man bei absoluter Durchsichtigkeit der Luft vom Gipfel des Mont-Blanc aus einen Kreis übersehen können, dessen Halbmesser 210 Kilometer beträgt, man würde also noch den Meerbusen von Genua erblicken: allein bei einer Entfernung von mehr als 100 Kilometern erscheinen die Gegenstände durchaus verschleiert durch die Dünste, verwaschen und unklar, und nur etwa bis zu einem Abstande von 60 Kilometern lassen sie sich deutlich erkennen. Es ist kein Zweifel, daß ein sehr scharfes Licht bei Nacht auf viel größere Entfernungen hin zu sehen ist, und deshalb hatten auch Martins und seine Begleiter den Plan gefaßt, daß sie sich Feuersignale zwischen dem Gipfel des Mont-Blanc und der Stadt Dijon, welche an der Grenze des Horizontes jenes Berges liegt, geben wollten; doch ist dieser Plan nicht zur Ausführung gekommen.

Nächst den wirklich durchsichtigen giebt es eine Reihe von Körpern, welche zwar noch Licht hindurch lassen, jedoch nicht in solchem Grade, daß man durch sie deutlich die Farben und Umrisse der Gegenstände unterscheiden könnte: man nennt dieselben durchscheinend und rechnet zu ihnen das mattgeschliffene Glas, das Papier, das Horn, den Alabaster und manche Flüssigkeiten, wie die Milch. Benetzt man das Papier oder tränkt man es mit Oel, so wird es stärker durchscheinend und sogar durchsichtig, wenn es dünn genug ist. Ebenso giebt es ein Kieselmineral, den Hydrophan, welches das Licht nicht hindurch läßt, so lange es trocken ist, aber durchscheinend wird, wenn man es einige Zeit in Wasser legt.

Stellt man aus einzelnen Körpern, welche für durchaus undurchsichtig gelten, z. B. wie manche Steine, Hölzer und Metalle, sehr dünne Platten

Digitized by Google

her, so kann das Licht dieselben in geringem Grade durchdringen. Am merkwürdigsten ist in dieser Beziehung das Gold, welches von den Goldschlägern in so dünnen Blättchen dargestellt werden kann, daß 10000 derselben über einander gelegt erst die Dicke eines Millimeters besitzen. Hält man ein solches Blättchen vor eine Lichtflamme, so erscheint es in schöner grüner Färbung: es läßt also Licht hindurch, und zwar dringt dasselbe nicht etwa durch Spalten, die vielleicht beim Schlagen in die Blättchen gekommen wären, da es in diesem Falle nicht eine besondere Färbung hätte annehmen können. Aus der außerordentlich großen Feinheit der Körpertheilchen erklärt es sich wohl auch, daß die mikroskopischen Thiere und Pflanzen, wie die Infusorien und feinsten Algen, durchsichtig erscheinen.

Ehe das Licht in unser Auge gelangen kann, hat es durch die Mittel, in denen es sich bewegt, eine bestimmte Bahn zurücklegen müssen, und es entsteht somit die Frage, wie diese Bahn beschaffen ist und was geschieht, wenn undurchsichtige Körper in seinen Weg treten. Beschränken wir uns zunächst auf den Fall, daß sich das Licht in einem einzigen, gleichartigen Mittel bewegt, so erfahren wir durch sehr einfache Versuche, daß die Richtung seiner Ausbreitung eine geradlinige ist.

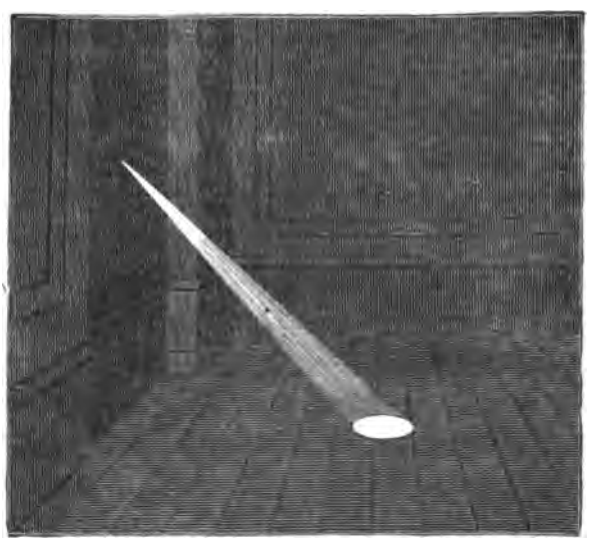


Fig. 148. Geradlinige Ausbreitung des Lichtes.

Stellt man zwischen die Flamme einer Kerze und das Auge eine Reihe undurchsichtiger Schirme, deren jeder ein kleines Loch enthält, so wird man die Lichtflamme nur dann erblicken, wenn sich alle die Löcher mit dem Auge und der Flamme in gerader Linie befinden. Durch eine lange gekrümmte Röhre kann das Licht nur dann hindurch dringen, wenn die Krümmung so schwach ist, daß man zwischen beiden Enden eine gerade Linie ziehen

Digitized by Google

kann, ohne dabei die Wände zu berühren. Befindet man sich in einem dunkeln, vollständig geschlossenen Zimmer, in welches das Licht der Sonne nur durch eine kleine Oeffnung im Fensterladen eindringen kann, so sieht man das Licht, besonders wenn etwas Staub in der Luft wirbelt, sich in Form eines Kegels ausbreiten, dessen Wände vollständig geradlinig sind (Fig. 148).

Wird die Sonne durch ein Gewölk verdeckt, durch dessen Lücken einzelne Strahlen sich Bahn brechen, so erscheinen dieselben in der Luft als geradlinige Streifen, wenigstens in ihrem Anfange (Fig. 149). Sind diese Linien sehr lang, dann bemerken wir freilich eine Krümmung,

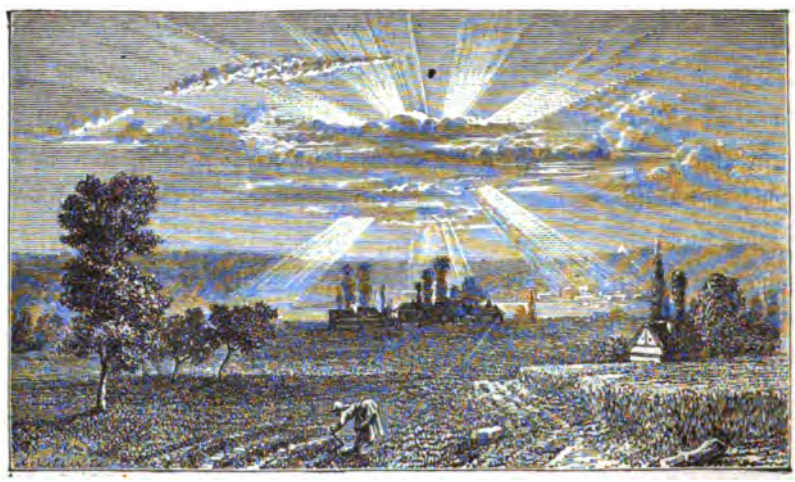


Fig. 149. Geradlinige Ausbreitung des Lichtes.

die nicht blos auf einer Täuschung unseres Auges beruht, sondern einen wirklichen physischen Grund hat: denn wenn das Licht von der Sonne zur Erde gelangt, so durchwandert es nach einander Schichten von verschiedener Dichtigkeit und muß dabei von seiner geradlinigen Bahn abweichen, wie wir später sehen werden; denn das Gesetz der geradlinigen Fortpflanzung gilt nur für den Fall, daß der Lichtstrahl sich in einem Mittel von durchaus gleichmäßiger Dichtigkeit bewegt.

Da sich das Licht von einem leuchtenden Punkte aus nach allen Seiten hin in geraden Linien verbreitet, so muß man diese einzelnen Lichtstrahlen als divergirende Linien ansehen, faßt man daher eine Anzahl benachbarter Lichtstrahlen oder ein Strahlenbündel ins Auge, so hat dasselbe die Gestalt eines Kegels oder einer Pyramide. Nur, wenn sich

Digitized by Google

die Lichtquelle in sehr großer Entfernung befindet, darf man die Strahlen als parallel, die Bündel als Cylinder oder Prismen ansehen.

§ 2. Schatten und Halbschatten.

Wenn es in der Welt nur leuchtende Körper und vollständig durchsichtige Mittel gäbe, so würde sich das Licht ungehindert nach allen Seiten ausbreiten und wir würden nur die ersteren sehen: in Wirklichkeit stellen sich aber dem Lichte eine Menge Körper in den Weg, die seine Ausbreitung hindern und es nach allen Seiten hin zurückwerfen, wodurch sie selbst erleuchtet und dadurch erst sichtbar werden; hinter dem Körper aber entsteht Dunkelheit und Schatten. Befindet sich ein undurchsichtiger Körper in einiger Entfernung einer Lichtquelle gegenüber, so wird nur ein Theil desselben erleuchtet, den andern trifft kein Strahl, und auch der Raum, der sich hinter ihm befindet, bleibt in Dunkelheit und bildet den *Schatten* des Körpers. Bringt man an diese Stelle nun einen Schirm, so werden denselben auch nur die Strahlen treffen, die seitwärts neben dem Körper vorbei können, während eine bestimmte Fläche auf dem Schirme in Dunkelheit bleibt: dieser auf einen Schirm projicirte Schatten heißt *Schlagschatten*.

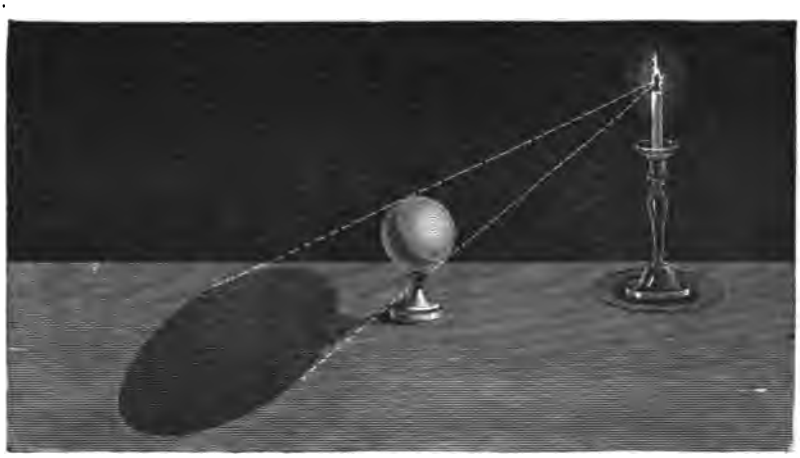


Fig. 150. Schattenkegel hinter einem undurchsichtigen Körper. Schlagschatten.

Beschränkt sich die Lichtquelle auf einen Punkt, so bildet der Schatten einen scharf begrenzten Kegel, der den Körper berührt und dessen Spitze in den Lichtpunkt fällt (Fig. 150). Auch die Oberfläche des schatten-

Digitized by Google

werfenden Körpers zerfällt dann in zwei scharfgetrennte Theile, von denen der eine beleuchtet ist, während sich der andere in vollständiger Dunkelheit befindet.

Strahlt dagegen das Licht von einer Fläche von größerer Ausdehnung, so ändert sich die Erscheinung in der Weise, wie es in Fig. 151 dargestellt ist. Wohl giebt es auch dann noch auf dem erleuchteten Körper einen Theil, der von allen Punkten der Lichtquelle das volle Licht empfängt, sowie ein anderer Theil, der in vollkommener Dunkelheit verbleibt: zwischen beiden aber liegt ein Grenzgebiet, dessen Punkte nur von einem Theile der leuchtenden Fläche Licht empfangen, sich also weder in voller Helligkeit, noch in gänzlicher Dunkelheit befinden. Ebenso wird hinter dem Körper der Raum, der gar kein Licht empfängt und

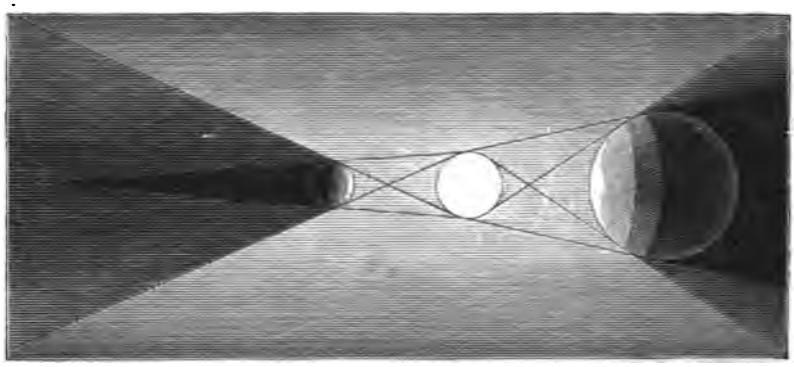


Fig. 151. Kegel des Kern- und Halbschattens.

den man Kernschatten nennt, von einer Hülle umgeben, die theilweise erleuchtet ist und Halbschatten heißt (Fig. 151): außerhalb dieses doppelten Kegels ist der Raum vollständig erleuchtet. Ist der leuchtende Körper größer, als der Schatten werfende, so läuft der Kernschatten in eine Spitze aus, sind beide gleich, so hat er die Form eines Cylinders, ist dagegen der zweite größer, als der erste, so dehnt sich der Schatten immer mehr aus, je weiter man sich entfernt.

Fängt man den Schatten auf einem Schirme auf, so nimmt der Halbschatten an Breite zu, je weiter man den Schirm entfernt: zugleich werden die Umrisse des Schlagschattens immer verwaschener. Schneidet man daher Bilder aus Papier aus und hält dieselben zwischen eine Flamme und eine Wand, so werden die Umrisse bei großer Annäherung an die Wand sehr scharf, bei größerer Entfernung aber immer undeutlicher und

Digitized by Google

verschwommener, und man wird bei einigem Probiren einen Abstand finden, bei welchem das Bild den Grad der Weichheit besitzt, der für den dargestellten Gegenstand am geeignetsten ist.

Fig. 152. Schattenbilder. Wirkung des Kern- und Halbschattens.

Kehren wir zu dem Versuche zurück, bei welchem das Licht der Sonne durch eine Oeffnung im Fensterladen in ein dunkles Zimmer fällt (Fig. 148). Hält man in den Strahlenkegel ein Blatt Papier, so wird die Stelle, welche auf demselben erleuchtet ist, stets von kreisförmiger oder elliptischer Gestalt sein, je nachdem man das Papier senkrecht oder schräg gegen die Axe des Kegels hält: die Form der Oeffnung ist hierauf von keinem Einflusse, vorausgesetzt, daß dieselbe im Verhältnisse zum Abstande des Papieres klein ist. Entfernt man das Papier von dem Laden, so wächst das auf ihm aufgefangene Bild der Sonne. Nimmt man an Stelle der Sonne als Lichtquelle eine Kerze, bringt man dieselbe in einem dunkeln Zimmer einem Schirme gegenüber, und hält man zwischen sie

Digitized by Google

und den Schirm ein Stück Pappe, in dem sich ein kleines Loch von beliebiger Gestalt befindet, so sieht man auf dem Schirme ein deutliches Bild der Kerze, welches aber verkehrt ist (Fig. 153). Der Grund für letztere Erscheinung ist leicht einzusehen: die Strahlen, welche vom oberen Theile der Kerze ausgehen, müssen, wenn sie ihren geradlinigen Weg hinter der Oeffnung fortsetzen, auf den unteren, die vom unteren ausgehenden auf den oberen Theil des Schirmes treffen. In gleicher Weise ist in dem vorhergehenden Versuche der runde Fleck das wirkliche Bild der Sonne, in dem man z. B. bei genauer Untersuchung etwa vorhan-

Fig. 153. Verkehrtes Bild einer Kerze.

dene Sonnenflecke auffinden könnte; auch hier würde die Lage derselben im Bilde die umgekehrte sein müssen.

Daß die Gestalt der Oeffnungen, wenn dieselben klein sind, nicht von Einfluß ist, läßt sich in folgender Weise zeigen. Nehmen wir beispielsweise an, die Oeffnung sei dreieckig, so wird jeder Punkt derselben die Spitze eines Strahlenkegels bilden, der auf dem Schirme eine kreisförmige Fläche erleuchtet. Betrachten wir nur die Kegel, die von den Eckpunkten des Dreiecks ausgehen, so bilden diese auf dem Schirme drei Kreise, deren Mittelpunkte die Ecken eines der Oeffnung congruenten Dreiecks bilden. Je mehr wir nun den Schirm entfernen, desto größer werden die Kreise, während der Abstand ihrer Mittelpunkte sich nicht

Digitized by Google

ändert. Für unser Auge wird also dieser Abstand immer unmerklicher und die Kreisflächen verschmelzen immer mehr zu einer einzigen, sodaß uns das Sonnenbild in jedem Falle kreisförmig erscheint. Befinden wir uns in einem Walde mit dichter Belaubung, durch welche die Sonnenstrahlen nur an einzelnen Punkten durchbrechen können, so sehen wir an jeder Stelle des Bodens, die von den Strahlen getroffen wird, ein kreisförmiges oder elliptisches Sonnenbild, je nachdem die Strahlen senk-

Fig. 154. Sonnenbilder auf dem Boden eines Waldes.

recht oder schräg auf den Fußboden treffen (Fig. 154). Bei Sonnenfinsternissen sind diese Bilder selbst sichelförmig, und diese Sicheln werden immer schmäler, je mehr die Verfinsterung zunimmt: die Seite, nach der sie sich krümmen, ist der Krümmung der wirklichen Sonnensichel entgegengesetzt.

Was vom Lichte der Sonne und einer Kerze gilt, das läßt sich ebenso von allen Strahlen sagen, die von irgend welchen Körpern aus-

Digitized by Google

gehen. Stellt man daher in einem dunkeln Zimmer einer kleinen Oeffnung im Laden gegenüber einen weißen Schirm auf, so erblickt man auf demselben das umgekehrte Bild der ganzen Landschaft, die vor dem

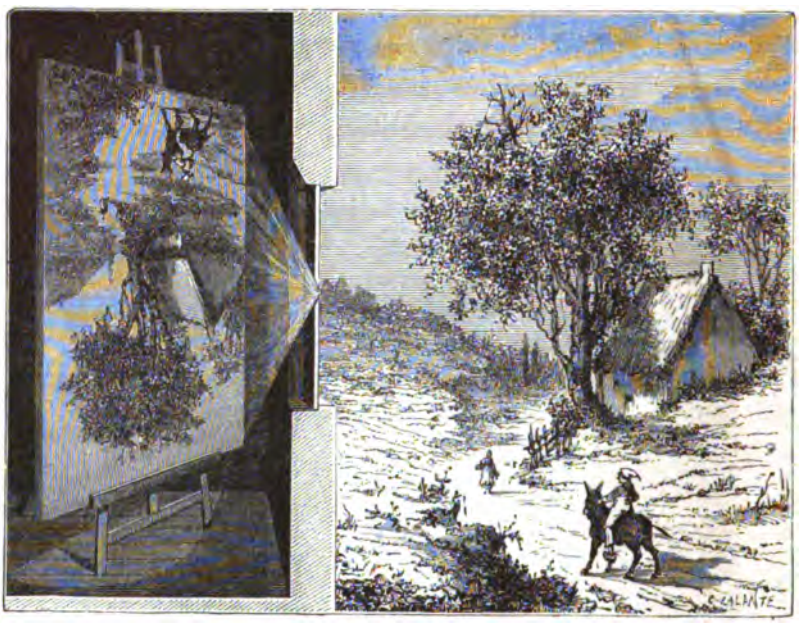


Fig. 155. Umgekehrtes Bild einer Landschaft in einem dunkeln Zimmer.

Zimmer liegt, wenn die Beleuchtung nur kräftig genug ist (Fig. 155). Je kleiner hierbei die Oeffnung ist, desto schärfer, zugleich aber auch desto lichtschwächer ist das Bild: durch größere Oeffnungen dringt zwar mehr Licht ein, die Umrisse der Gegenstände werden aber immer verwaschener.

§ 3. Geschwindigkeit des Lichtes.

Daß das Licht zu seiner Ausbreitung im Raume eine gewisse Zeit gebraucht, daß es nicht in demselben Momente, in dem es in größerer Entfernung aufblitzt, auch schon in unser Auge gelangt oder den erleuchteten Gegenstand getroffen haben kann, das war schon von Alters her wahrscheinlich: die Richtigkeit dieser Annahme aber zu constatiren ist erst vor nunmehr gerade 200 Jahren gelungen, da alle Versuche, welche man bis dahin mit irdischen Lichtquellen angestellt hatte, wegen der ungeheuern Geschwindigkeit des Lichtes zu keinem Resultate führten. Denn nicht weniger als 310000 Kilometer oder 42000 geographische

Digitized by Google

Meilen durchläuft das Licht in Zeit einer Secunde, sodaß es also noch nicht $1^1/_4$ Secunde gebraucht, um vom Monde, und nur 8 Minuten 13 Secunden, um von der Sonne bis zu uns zu gelangen. Wie gering diese Zeit ist, das sieht man daraus, daß eine Kanonenkugel, die in der Secunde 400^m durchläuft, zu letzterem Wege über zwölf Jahre gebrauchen würde. Vergleicht man die Geschwindigkeit des Lichtes mit der des Schalles, so findet man, daß sie 900000 Mal, und ebenso, daß sie 10000 Mal so groß ist, als die Geschwindigkeit der Erde in ihrer Bahn.

Die Methoden kennen zu lernen, durch welche diese enorme Geschwindigkeit sich messen läßt, soll jetzt unsere Aufgabe sein, und zwar wollen wir mit der ältesten beginnen, zur Erklärung aber einige Bemerkungen vorausschicken. Denken wir uns, es würden an einem bestimmten Punkte in gleichmäßigen Zwischenräumen Lichtsignale gegeben, man ließe z. B. in Zwischenräumen von 10 zu 10 Minuten Pulver aufblitzen, so wird ein Beobachter, der sich in einiger Entfernung befindet und seinen Standpunkt nicht verläßt, jedes dieser Signale etwas später sehen, als es gegeben worden ist, allein die Verzögerung wird für alle einzelnen Lichtblitze von genau gleicher Größe sein, das Eintreffen des Lichtes wird sich um gleich viel verspäten, sodaß die Zwischenzeiten zwischen den Lichtblitzen, wie sie der Beobachter erblickt, immer wieder genau 10 Minuten betragen, mag sich das Licht schnell oder langsam bewegen. Begiebt sich aber der Beobachter, nachdem er die Zeit notirt hat, zu welcher er das eine Signal wahrnahm, auf einen entfernteren Standpunkt und erwartet dort das nächste Signal, so wird dasselbe längere Zeit brauchen, um zu ihm zu gelangen, da das Licht einen weiteren Weg zurücklegen muß. Um die Darstellung etwas anschaulicher zu machen, wollen wir die Geschwindigkeit des Lichtes viel geringer voraussetzen, als sie in Wirklichkeit ist, und wollen annehmen, daß sich der Beobachter nach dem einen Signale um einen Weg von 20 Kilometern entfernt hat, und daß die Zeit, die vergeht, bis er das nächste Signal wahrnimmt, von ihm zu 10 Minuten 2 Secunden bestimmt wurde, so wird er hieraus schließen müssen, daß die 2 Secunden, um welche das Signal länger ausblieb, die Zeit ist, welche das Licht gebraucht, um die neu hinzukommenden 20 Kilometer zurückzulegen, daß seine Geschwindigkeit also 10 Kilometer betrug. Hätte sich der Beobachter dagegen um 20 Kilometer genähert, so würde ihm die Zwischenzeit um ebensoviel kürzer erscheinen müssen.

Digitized by Google

Nun ist ja die Geschwindigkeit des Lichtes in der That viel größer; daher wird man mit Hülfe von irdischen Signalen und irdischen Entfernungen in der angeführten Weise nicht zum Ziele gelangen: wie aber, wenn wir Entfernungen im Weltenraume und Vorgänge, die im Sonnensysteme regelmäßig erfolgen, zu diesen Bestimmungen benutzen? Mit dem neu erfundenen Fernrohre hatte Galilei und Simon Marius schon am Anfange des siebzehnten Jahrhunderts gefunden, daß der glänzendste Planet unseres Systems, daß Jupiter von einer kleinen Welt, gebildet aus vier Monden, umkreist wird. Diese Monde bewegen sich in ziemlich kurzen Zeiträumen um ihren großen Centralkörper in Bahnen, die sich nur sehr wenig von der Ebene, in der Jupiter die Sonne umkreist, entfernen. Was also bei unserem Monde im Ganzen selten ist, das tritt bei den Monden des Jupiters fast bei jedem Umlaufe ein: sie treten in den Schattenkegel, den Jupiter hinter sich wirft und erleiden dadurch eine Verfinsterung. Mittels Fernrohren von nur mäßiger Vergrößerung lassen sich diese Verfinsterungen, die wenigstens für die drei innersten Monde ziemlich häufig eintreten, leicht beobachten, und wir wollen mit Hülfe von Fig. 156 uns klar machen, welche von den beiden wichtigsten Erscheinungen, der Eintritt in den Schatten oder der Austritt aus demselben, in jeder einzelnen Stellung von der Erde aus beobachtet werden kann.

Während die Erde T ihre Bahn um die Sonne beschreibt, bewegt sich der entferntere Planet Jupiter J ebenfalls in derselben Richtung weiter, jedoch viel langsamer, sodaß er noch nicht den elften Theil seines Umlaufes vollendet hat, während die Erde den ganzen Kreis durchläuft. Befindet sich nun die Erde in T, Jupiter in J, so steht er für unseren Standpunkt in derselben Richtung am Himmel, wie die Sonne S, er ist mit ihr in Conjunction, und also bleibt er uns unsichtbar. Bewegen sich nun die Planeten in der Richtung der Pfeile weiter, so werden wir nach einiger Zeit Jupiter am Morgenhimmel vor Sonnenaufgang erblicken: wir sehen seine Monde und können den Eintritt derselben in den Schatten beobachten; der Austritt dagegen ist uns durch die Scheibe Jupiters selbst verdeckt. Je weiter wir uns nun in unserer Bahn bewegen, desto weiter scheint sich Jupiter von der Sonne zu entfernen, bis sich die Erde in T′, Jupiter in J′ befindet: hier steht Jupiter der Sonne gerade gegenüber, er ist mit ihr in Opposition und zeigt sich uns in

Digitized by Google

seinem größten Glanze; allein die Verfinsterungen seiner Monde entziehen sich vollständig unseren Blicken, da uns der ganze Schattenkegel durch den Körper des Planeten verdeckt ist. Nach der Opposition dagegen läßt sich die Verfinsterung der Monde wieder beobachten, wenn auch nicht

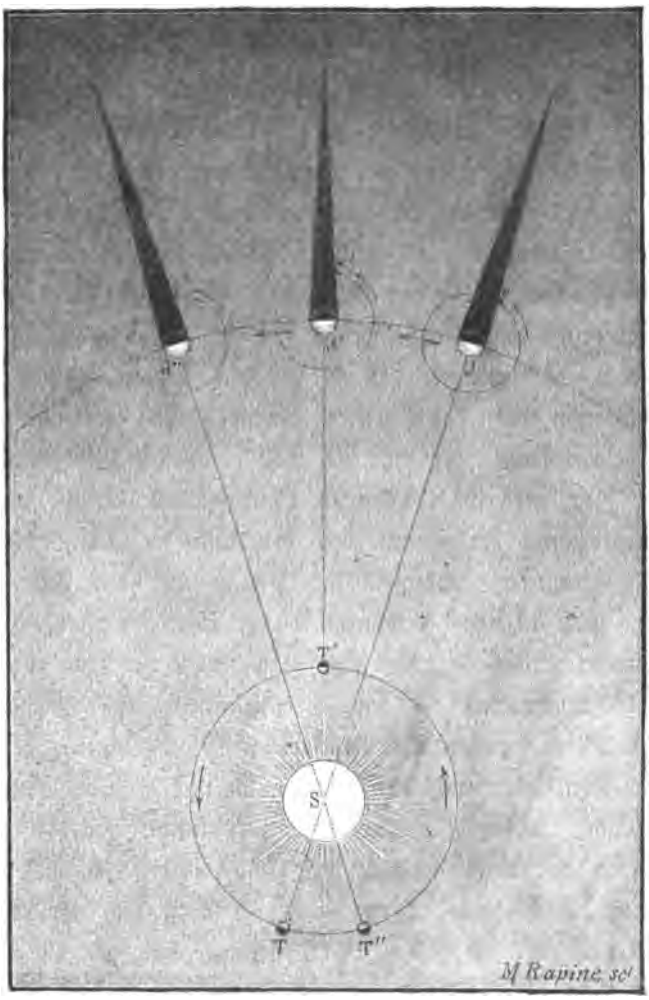


Fig. 156. Bestimmung der Geschwindigkeit des Lichtes durch die Verfinsterungen der Jupitersmonde.

bei ihrem Eintritte, so doch bei ihrem Ende, bis Erde und Jupiter in die Stellung T'' J'' gelangt, und also die nächste Conjunction eingetreten ist.

Jahrelang fortgesetzte Beobachtungen hatten die Umlaufszeit der Monde mit großer Genauigkeit ergeben, und da man weiter gefunden

Digitized by Google

hatte, daß die Bahnen wenigstens der beiden innersten Monde sehr nahe kreisförmig sind, so müssen die Verfinsterungen derselben immer nach gleichen Zwischenzeiten erfolgen. Da wir uns aber auf unserer Bahn zwischen T und T′ dem Jupiter immer mehr nähern, so werden uns diese Zwischenzeiten, wie wir oben auseinandersetzten, kürzer, im anderen Theile der Bahn dagegen länger erscheinen. Die Verfinsterungen treten daher nach der Conjunction immer etwas zeitiger ein, und dies summirt sich so stark, daß der Unterschied zur Zeit der Opposition 16 Minuten 35 Secunden beträgt. Nach der Opposition, wenn wir uns von T′ bis T″ bewegen, entfernen wir uns wieder vom Jupiter, die Zwischenzeiten wachsen, sodaß bis zur nächsten Conjunction die Differenz vollständig ausgeglichen ist. Man sieht leicht, daß jener Zeitunterschied mit der Zeit übereinstimmen muß, welche das Licht mehr gebraucht, um den längeren Weg zurückzulegen, daß es also die Zeit ist, welche das Licht zum Durchlaufen des Durchmessers der Erdbahn gebraucht. Hieraus folgt, daß ein Strahl, der von der Sonne ausgeht, die Erde in der Hälfte der Zeit, also in 8 Minuten 17 Secunden erreicht: nimmt man für die Entfernung der Sonne von der Erde die ältere Angabe von 153 Mill. Kilometer, so ergiebt sich hieraus für das Licht eine Geschwindigkeit von 310000 Kilometer in der Secunde; zeigt es sich aber, wie sehr wahrscheinlich ist, daß jene Zahl etwas zu groß ist, so wird auch die Geschwindigkeit des Lichtes entsprechend zu verringern sein. Sobald die Beobachtungen über den letzten Venusdurchgang genau reducirt sein werden, wird auch diese Größe sich mit größerer Sicherheit bestimmen lassen; vorläufig wollen wir noch immer die Zahl 310000 Kilometer für die Geschwindigkeit des Lichtes beibehalten.

Dies ist die Methode, durch welche es zuerst dem dänischen Astronomen Olof Römer im Jahre 1675 gelang, die Zeit zu bestimmen, welche das Licht braucht, um von der Sonne bis zu uns zu gelangen. Eine andere, ebenso wichtige Entdeckung, durch welche sich die Geschwindigkeit ebenfalls auffinden läßt, wurde ungefähr funfzig Jahre später durch den Astronomen Bradley gemacht: wir meinen die Aberration der Fixsterne. Um uns auch diese anschaulich zu machen, wollen wir uns wieder eines Vergleiches bedienen, der unseren Vorstellungen näher liegt.

Fällt dichter Regen in genau senkrechter Richtung zur Erde, und

Digitized by Google

stellen wir eine gerade Röhre aufrecht hin, so wird ein Regentropfen, der in die Mitte des oberen Endes der Röhre fällt, auch den Mittelpunkt des unteren Endes treffen, solange die Röhre ruhig steht. Fängt man nun an die Röhre mit gleichmäßiger Geschwindigkeit in bestimmter Richtung weiter zu rücken, so trifft jener Tropfen nicht mehr die Mitte des unteren Endes, sondern wird, wenn die Geschwindigkeit groß genug ist, während des Niederfallens gegen die Wand der Röhre schlagen: will man, daß er doch den Mittelpunkt der Grundfläche treffen, so muß man die Röhre nach der Seite hin, nach welcher sie sich bewegt, ein wenig neigen, und zwar muß ihr oberes Ende über dem unteren um soviel überhängen, als sich die Röhre in der Zeit weiter bewegt, die der Tropfen braucht, um ihre Länge zu durchlaufen. Die Neigung der Röhre ist also ein Mittel, um die Fallgeschwindigkeit des Tropfen mit der Geschwindigkeit, mit der die Röhre bewegt wird, zu vergleichen: hat die Röhre z. B. eine Länge von 1^{m} und hängt ihr oberes Ende 1^{cm} über, so ist die Fallgeschwindigkeit 100 Mal so groß, als die Geschwindigkeit der Röhre. Bringt man nun die Röhre in einen Kahn und fährt man im Kreise um eine Insel, so muß man auch die Röhre immer nach der Seite neigen, nach welcher man sich gerade bewegt: während einer Umfahrt wird also die Röhre einen Kegel beschreiben, dessen Axe die senkrechte Linie ist.

Die Anwendung dieses Vergleichs ergiebt sich nun leicht: der Kahn ist die Erde, die Insel die Sonne, der Teich ist die Ebene der Ekliptik, in der sich die Erde um die Sonne bewegt, der Regen aber die Lichtstrahlen, die uns ein Stern sendet, der senkrecht über dieser Ebene, also im sogenannten Pole der Ekliptik steht. Beobachtet man einen solchen Stern während eines Jahres, so muß man wirklich das Fernrohr in einem Kegel bewegen, dessen Seite mit seiner Mittellinie, wie Bradley 1728 zuerst zeigte, einen Winkel von $20{,}25''$ einschließt. Für diesen kleinen Winkel beträgt nun die Größe, um welche das obere Ende des Fernrohres zur Seite gerückt ist, etwa den 10000. Theil der Länge des Rohres: das Licht bewegt sich daher 10000 Mal so schnell, als die Erde in ihrer Bahn. Mit Benutzung der oben angeführten Angabe für die Entfernung der Erde von der Sonne findet man dieselbe Geschwindigkeit, die sich aus den Beobachtungen der Verfinsterungen der Jupitersmonde ergab.

Digitized by Google

Endlich ist, was Galilei vergebens versuchte, in neuerer Zeit den Physikern Fizeau und Foucault gelungen, nämlich durch verhältnißmäßig kleine Entfernungen und mittels künstlich hervorgerufener Bewegungen die Geschwindigkeit des Lichtes zu bestimmen; und wir wollen jetzt versuchen, eine Vorstellung von der Methode zu geben, die der erstgenannte Gelehrte anwendete. In Suresnes richtete sich Fizeau einen Beobachtungsort ein, an welchem er ein Fernrohr aufstellte, dessen Construction aus Fig. 157 ersichtlich ist. Durch ein seitwärts angebrachtes Rohr fielen die Strahlen eines sehr kräftigen künstlichen Lichtes, nachdem sie erst durch zwei Linsen etwas convergent gemacht waren, auf ein nicht belegtes Spiegelglas M, das mit ihrer Richtung einen Winkel von 45° bildete und sie längs des Fernrohres zurückwarf. Durch die Objectivlinse im

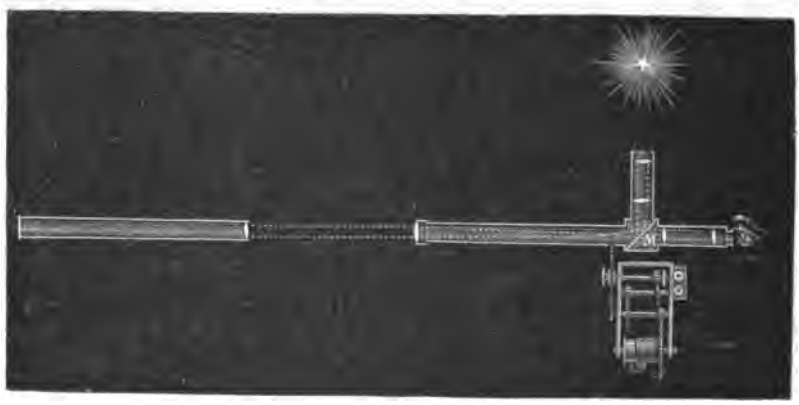


Fig. 157. Fizeau's Apparat zur directen Bestimmung der Geschwindigkeit des Lichtes.

vorderen Theile des Rohres wurde allen Strahlen parallele Richtung gegeben, und so gelangten sie an eine zweite Station auf dem Montmartre, wo sie wieder durch eine Linse gesammelt und auf einem Spiegel vereinigt wurden (s. die linke Seite von Fig. 157), der sie nach dem Punkte, von welchem sie ausgegangen waren, wieder zurückwarf. Die zurückkehrenden Strahlen wurden im ersten Fernrohre wieder gesammelt, drangen durch das nicht belegte Spiegelglas M und konnten mittels einer Ocularlinse beobachtet werden, nachdem sie den Weg zwischen Suresnes und Montmartre zweimal durchlaufen hatten.

Die Aufgabe bestand nun darin, die Zeit genau zu bestimmen, welche die Lichtstrahlen zu diesem doppelten Weg gebrauchten; und zu diesem Zwecke ließ Fizeau durch die Wand des Fernrohres an der Stelle,

Digitized by Google

wo die Strahlen am stärksten concentrirt waren, ein Zahnrad R eingreifen, das durch ein Uhrwerk in sehr schnelle und gleichmäßige Umdrehungen versetzt werden konnte. So oft daher ein Zahn in den Weg des Lichtes trat, hinderte er die Ausbreitung desselben, während es durch die Lücken zwischen den Zähnen sich frei bewegen konnte. Ist die Stellung des Rades vor Beginn der Rotationsbewegung eine solche, daß das Licht, durch eine Lücke des Zahnes hindurchgehen kann, so wird auch der vom Montmartre zurückkehrende Strahl den Weg offen finden und in das Auge des Beobachters gelangen: man sieht also dann den Lichtpunkt in voller Stärke (Fig. 158a). Beginnt nun das Rad seine Umdrehung mit nicht zu großer Geschwindigkeit, so werden von den Strahlen, die durch eine Lücke hindurchgegangen sind, einige bei ihrer Rückkehr an

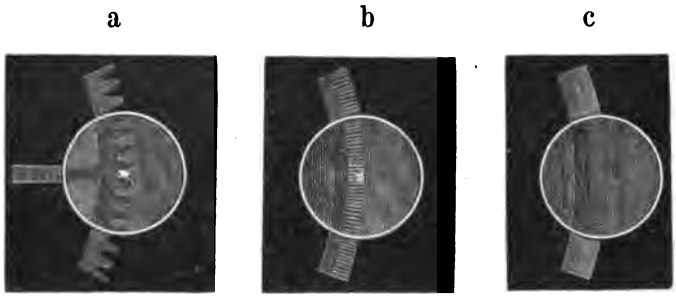


Fig. 158. Fizeau's Versuch zur Bestimmung der Geschwindigkeit des Lichtes.
a. Der Lichtpunkt, wie er zwischen den Zähnen des ruhenden Rades erscheint.
b. Theilweise Verfinsterung des Lichtpunktes. c. Vollständige Verfinsterung.

Stelle der Lücke einen Zahn finden: sie werden daher in ihrem Laufe gehemmt und können nicht in das Auge des Beobachters gelangen; das Licht hat also an Intensität eingebüßt und erscheint matter, als zuvor (Fig. 158b). Je schneller sich das Rad dreht, desto mehr Strahlen werden in ihrem Laufe gehemmt, bis endlich eine Umdrehungsgeschwindigkeit erreicht ist, bei welcher alle Strahlen, die durch eine Lücke hinausgegangen sind, bei ihrer Rückkehr auf den folgenden Zahn treffen: es tritt vollständige Verfinsterung ein (Fig. 158c). Es ist leicht einzusehen, daß in diesem Falle das Licht, um den Weg von Suresnes nach dem Montmartre und wieder zurück zu durchlaufen, ebensoviel Zeit gebraucht, als erforderlich ist, damit eine Lücke des Rades durch einen Zahn ersetzt werde.

Bei seinen Versuchen wendete nun Fizeau ein Rad von 720 Zähnen

Digitized by Google

an und sah, daß die Verfinsterung eintrat, sobald das Rad in einer Secunde 12,6 Umdrehungen machte: es gingen also die 720 Zähne in der Secunde 12,6 mal vor dem Auge vorüber und jeder einzelne Zahn wurde daher von dem nächstfolgenden nach Verlauf des 9072. Theiles einer Secunde ersetzt; damit aber an Stelle einer Lücke der nächste Zahn trat, war nur die Hälfte dieser Zeit, also nur der 18144. Theil einer Secunde, erforderlich. In dieser Zeit hat das Licht die Entfernung von Suresnes nach Montmartre, welche 8633 m betrug, zweimal durchlaufen, würde also in einer Secunde in runder Summe 313000 Kilometer zurücklegen: ein Resultat, das mit dem aus astronomischen Beobachtungen abgeleiteten recht gut stimmt. Auch andere Versuche, die Foucault mittels rotirender Spiegel anstellte, gaben eine Größe, die von den erwähnten Werthen nur wenig abweicht.

Drittes Kapitel.

Reflexion des Lichtes.

§ 1. Gesetze der Reflexion.

Längst, bevor der Mensch daran dachte, Metalle und Gläser zu poliren, um ihre Oberfläche in Spiegel zu verwandeln, die den Bedürfnissen des häuslichen Lebens und der Wissenschaft, oder auch nur der menschlichen Eitelkeit dienen sollten, konnten in der Natur zahlreiche Erscheinungen beobachtet werden, die in der Reflexion der Lichtstrahlen ihren Grund haben. Jeder Teich, jeder See, dessen Gewässer sich in Ruhe befinden, bildet einen Spiegel, der unserem Auge die getreue Nachbildung der Landschaft, die ihn umgiebt, des blauen Himmelsgewölbes, der Wolken, der Sonne oder der Sterne, der Bäume, Felsen und lebenden Wesen zurückwirft (Tafel III*). Alle diese Erscheinungen würden wohl im Stande sein, uns über den Weg aufzuklären, den das Licht einschlägt, wenn es von den leuchtenden Punkten ausgehend auf eine Oberfläche trifft, welche bewirkt, daß es wieder zurückprallt, und auch ohne künstliche Apparate könnten wir durch jene Mittel, die uns die Natur freiwillig bietet, die Gesetze jenes Rückpralles kennen lernen: allein das Bedürfniß nach Erkenntniß erwacht immer ziemlich spät, immer erst

*) Tafel III ist mit der ersten Lieferung ausgegeben.

Digitized by Google

Erſcheinungen der Reflexion des Lichtes.

Digitized by Google

LIBRARY
OF THE
UNIVERSITY
OF
CALIFORNIA

Digitized by Google

dann, wenn die Erscheinungen durch ihre Häufigkeit und dadurch, daß sie uns durch die Gewohnheit zu etwas Alltäglichem werden, das Wunderbare für uns verloren haben; und so hatte man längst jene Erscheinungen der Natur nachgeahmt und sich mit ihnen vertraut gemacht, ehe man die Gesetze, denen sie folgen, und von welchen wir jetzt handeln wollen, ergründete.

Wir haben im vorigen Kapitel ausführlich besprochen, daß ein Lichtstrahl sich in gerader Linie weiter bewegt, solange er in einem und demselben Mittel verbleibt, mag dasselbe aus Luft oder einem anderen Gase, oder auch aus einem flüssigen oder festen durchsichtigen Stoffe bestehen: und auch für den luftleeren Raum, der die Weltkörper von einander trennt, dürfen wir wohl dieselbe Ausbreitungsweise voraussetzen. Sobald aber ein Strahlenbündel an die Grenzfläche zweier Mittel von verschiedener Natur, besonders von verschiedener Dichtigkeit, gelangt, so ändern sich die Verhältnisse: ein Theil der Strahlen kehrt von der trennenden Fläche wieder in das Mittel zurück, in dem er sich zuvor bewegt hatte, er wird *reflectirt*; ein anderer Theil aber dringt in das zweite Mittel ein, vorausgesetzt, daß dasselbe durchsichtig ist, allein er wird dabei aus seiner Bahn abgelenkt oder *gebrochen*. Beide Erscheinungen müssen wir auf den folgenden Seiten genauer untersuchen: und wir wenden uns jetzt zu der zuerst genannten.

Die Art, wie die Lichtstrahlen von einer Oberfläche zurückgeworfen oder reflectirt werden, hängt von verschiedenen Umständen ab, unter denen die Beschaffenheit der Oberfläche selbst an erster Stelle zu erwähnen ist. Handelt es sich um Körper, deren Oberfläche von Natur glatt und eben ist, wie die Flüssigkeiten, wenn sie sich nicht bewegen, besonders Quecksilber, oder denen durch mechanische Mittel eine solche Glätte mitgetheilt werden kann, wie Glas, viele Metalle, u. s. w., so werden die Lichtstrahlen in bestimmter Richtung nach streng giltigen Gesetzen regelmäßig zurückgeworfen, sodaß sie für unser Auge von Punkten auszugehen scheinen, welche entweder vor oder hinter der reflectirenden Fläche liegen: wir sehen also dann nicht die Körper, die uns das Licht zurückwerfen, sondern das Licht scheint uns von Bildern der Gegenstände zu kommen, welche die Strahlen erst nach der reflectirenden Fläche gesendet haben. Gestalt, Größe und Lage dieser Bilder aber hängt von der Gestalt der reflectirenden Fläche ab, welche man einen *Spiegel* nennt. Ist da-

Digitized by Google

gegen die Oberfläche matt und rauh, so ist die Reflexion unregelmäßig, es entstehen keine Bilder der Gegenstände, von denen das Licht ausgeht, sondern jeder Punkt der Oberfläche selbst wird gleichsam zum Ausgangspunkte von Lichtstrahlen, sodaß unserem Auge diese vom Licht getroffene Fläche sichtbar wird.

Wenn wir jetzt den Weg eines Strahles verfolgen wollen, der von einem ebenen Spiegel zurückgeworfen wird, so ist zunächst klar, daß sich

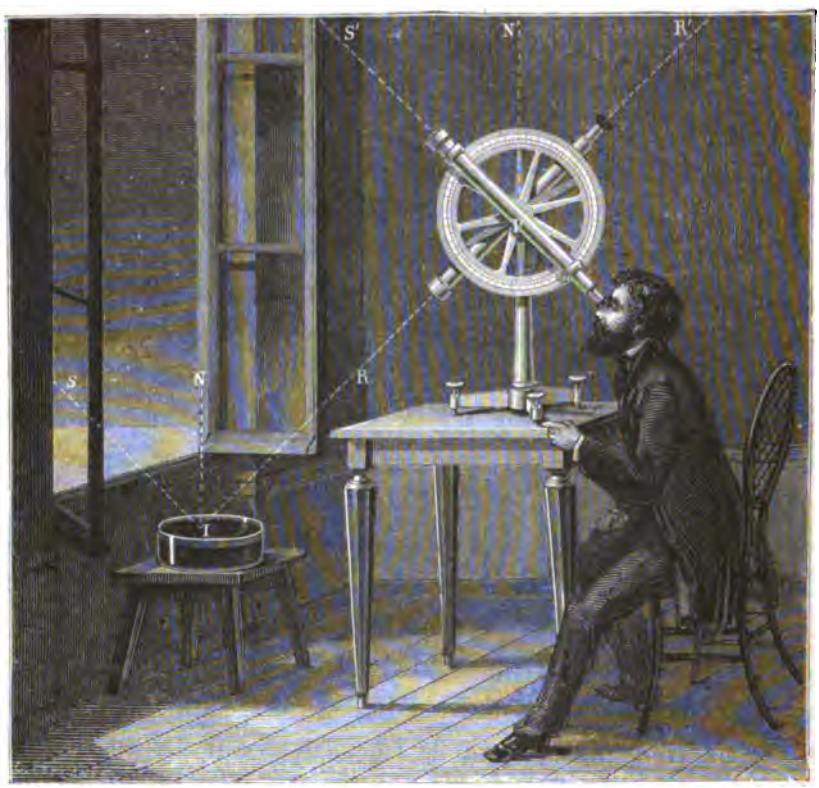


Fig. 189. Experimenteller Beweis des Reflexionsgesetzes.

auch der reflectirte Strahl in gerader Linie fortpflanzen muß, da er in dasselbe Mittel wieder zurückgeworfen wird, von dem wir vorausgesetzt haben, daß es durchaus gleichartig sei; es fragt sich also nur noch, in welcher Richtung sich dieser Strahl bewegt. Betrachten wir zu diesem Zwecke die Strahlen, die von einem Sterne zu uns gelangen und die wir wegen der großen Entfernung des leuchtenden Punktes als parallel ansehen können, und lassen wir dieselben von der Oberfläche eines Quecksilberspiegels zurückwerfen. Sei SI (Fig. 159) einer dieser Strahlen,

Digitized by Google

der den Spiegel in I trifft und in der Richtung IR zurückgeworfen wird, und denken wir uns noch durch I eine Lothlinie IN gelegt, welche also auch auf der Queckſilberfläche ſenkrecht ſteht und Einfallsloth heißt, ſo heißt der Winkel SIN der Einfallswinkel, NIR der Reflexionswinkel. Unterſucht man nun den Weg des einfallenden und des zurückgeworfenen Strahles genauer, ſo findet man die beiden folgenden Geſetze, welche die Grundlage der ganzen Lehre von der Zurückwerfung der Lichtſtrahlen bilden:

1. Der einfallende und der zurückgeworfene Strahl liegen mit dem Einfallslothe in einer Ebene, und

2. der Reflexionswinkel iſt dem Einfallswinkel gleich.

Zur Beſtätigung des zweiten Geſetzes wendet man das Verfahren an, das durch Fig. 159 anſchaulich gemacht wird. Man ſtellt hinter dem Queckſilberſpiegel einen ſenkrechten Theilkreis auf, an welchem ſich zwei Fernrohre befinden, die ſich in verticaler Richtung um den Mittelpunkt des Kreiſes drehen laſſen. Das eine dieſer Fernrohre richtet man nach dem Queckſilberſpiegel ſo, daß man in ihm das Spiegelbild des Sternes erblickt, oder, mit anderen Worten, man bringt es in die Richtung des reflectirten Strahles; das andere Rohr aber ſtellt man direct auf den Stern ein, giebt ihm alſo eine Richtung, die der Richtung des einfallenden Strahles parallel iſt. Legt man nun noch durch den Mittelpunkt I' des Theilkreiſes einer Lothlinie I'N', ſo geben die ſorgfältigſten Ableſungen am Theilkreiſe, daß die beiden Fernrohre mit dieſer Linie gleiche Winkel bilden. Wegen des Parallelismus der Linien iſt aber Winkel SIN = Winkel S'I'N' und Winkel NIR = Winkel N'I'R'; hat alſo der Verſuch ergeben, daß S'I'N' = N'I'R', ſo folgt auch, daß SIN = NIR: jener iſt aber der Einfalls-, dieſer der Reflexionswinkel.

Dieſes einfache Geſetz gilt zunächſt nur für ebene Spiegel: man kann es aber auch ſofort auf gekrümmte Spiegel übertragen, ſobald man jedes kleine Stück der Oberfläche derſelben als nahezu eben anſieht und das Einfallsloth in ihm conſtruirt.

§ 2. Bilder in ebenen Spiegeln.

Gehen wir jetzt weiter zu der Unterſuchung der Bilder, wie ſie ſich in den Spiegeln von verſchiedener Geſtalt je nach der Stellung der

Digitized by Google

Gegenstände zeigen, und beginnen wir mit den Spiegeln, deren Fläche eine Ebene bildet, und die man Planspiegel nennt, wie die gewöhnlich in den Zimmern angewendeten Spiegel, sowie die Oberflächen der Flüssigkeiten, um darauf auch über sphärische, cylindrische und kegelförmige Spiegel einiges hinzufügen.

Stellt man irgend einen Gegenstand vor einem Planspiegel auf, so erblickt man bekanntlich, wenn man in den Spiegel hineinsieht, ein getreues Bild des Gegenstandes, welches mit ihm in Gestalt, Größe und Farbe genau übereinstimmt: der einzige Unterschied ist der, daß es zum Gegenstande selbst symmetrisch ist, d. h. es sind in ihm die rechte und linke Seite mit einander vertauscht. Ferner ist der scheinbare Abstand des Bildes hinter der spiegelnden Fläche genau ebenso groß, als der wirkliche Abstand des Gegenstandes vor derselben. Ueber alle diese Erscheigungen kann man sich mit Hülfe von Fig. 160 leicht Rechenschaft geben:

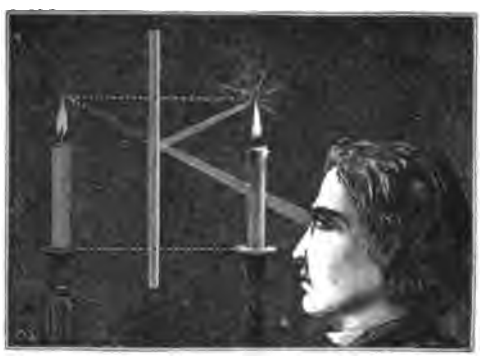


Fig. 160. Reflexion durch einen Planspiegel. Gestalt und Stellung des Bildes.

denn gehen z. B. von der Spitze der Kerzenflamme verschiedene Strahlen aus, so werden dieselben zwar, nachdem sie vom Spiegel zurückgeworfen sind, noch ferner divergiren; denkt man sie sich aber nach rückwärts verlängert, so schneiden sie sich, wegen der Gleichheit des Einfalls- und des Reflexionswinkels, dennoch in einem Punkte. Treffen sie daher auf unser Auge, so wird für dasselbe der Schein entstehen, als kämen sie von einem Punkte hinter dem Spiegel, welcher mit der Spitze der Kerze in gleicher Höhe und gleichem Abstande von der spiegelnden Fläche liegt. Verändern wir unsere Stellung vor dem Spiegel, so wird doch jener Punkt, das Spiegelbild der Flammenspitze, seine Stellung unverändert beibehalten, wenn er von uns auch durch andere Theile der Spiegelfläche gesehen wird. In derselben Weise, wie die Spitze wird auch jeder andere Punkt der Kerze sein Bild hinter der Spiegelfläche besitzen, und diese Bilder werden sich so zusammensetzen, daß sie uns als ein Ganzes erscheinen, das dem gespiegelten Gegenstande

Digitized by Google

bis auf die Vertauschung von rechts und links vollständig gleicht und mit ihm von der spiegelnden Fläche gleichen Abstand hat.

Aus Fig. 161 ist ersichtlich, daß man in einem Spiegel auch das Bild eines Gegenstandes erblicken kann, der sich gar nicht dem Spiegel gegenüber befindet, sondern seitwärts gerückt ist: es genügt hierbei, daß das Auge nur noch von den reflectirten Strahlen getroffen wird, d. h. daß es sich innerhalb des Raumes befindet, welcher in der Figur von den Linien MQ und M'P begrenzt wird. Man nennt diesen Raum das Gesichtsfeld für den gespiegelten Gegenstand.

Fig. 161. Reflexion durch einen Planspiegel. Größe des Gesichtsfeldes.

Bei den gewöhnlichen Spiegeln ist das Bild dem Gegenstande an Gestalt und Färbung meistens nicht ganz genau entsprechend, was darin seinen Grund hat, daß es sehr schwer hält, vollständig ebene und glatte Flächen herzustellen. Durch die Abweichung von der Ebene aber werden die Bilder verzerrt, und durch die mangelhafte Politur mischen sich unter das regelmäßig reflectirte Licht noch unregelmäßig zurückgeworfene oder diffuse Strahlen, welche die Färbung des Bildes nach der Farbe des Stoffes, aus dem der Spiegel verfertigt ist, modificiren. Auch die In-

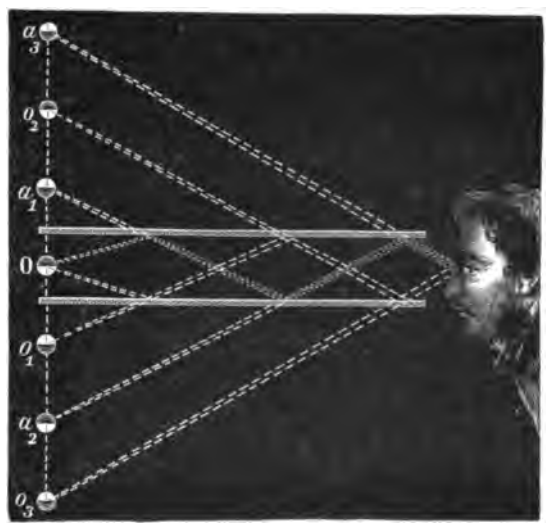


Fig. 162. Vielfache Bilder in zwei parallelen Spiegeln.

Digitized by Google

tenſität des zurückgeworfenen Strahles iſt ſtets geringer, als die des einfallenden. Daß man in Glasſpiegeln, die mit Zinnamalgam oder Silber belegt ſind, von einem Gegenſtande mehrere Bilder erblickt, werden wir ſpäter erklären. Metallſpiegel zeigen nicht denſelben Uebelſtand: dafür aber iſt auch ihre Lichtſtärke nicht ſo groß, und ihre Oberfläche bekommt bald eine Trübung, wenn ſie in Berührung mit nicht ganz reiner Luft kommt.

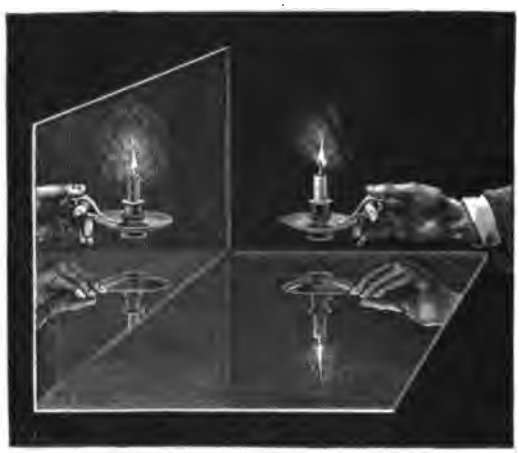


Fig. 163. Bilder in Spiegeln, die rechtwinklig zu einander ſind.

Durch Vereinigung mehrerer Planſpiegel kann man einige merkwürdige Erſcheinungen herbeiführen, die ſich aus der mehrfachen Reflexion der Strahlen erklären laſſen: der Vergleich mit dem mehrfachen Echo liegt hier zu nahe, um ihn weiter auszuführen. Stellt man einen Gegenſtand O zwiſchen zwei parallele Spiegel (Fig. 162), ſo entſtehen in beiden zunächſt die Bilder a_1 und o_1, die wieder Strahlen ausſenden, welche die Entſtehung der Bilder a_2 und o_2 veranlaſſen, und ſo fort, ſodaß ein an einem geeigneten Platze aufgeſtelltes Auge eine unbegrenzte Reihe von Bildern erblicken würde, wenn die entfernteren nicht durch die vielfache Reflexion ſo viel an ihrem Lichte einbüßten, daß ſie auf das Auge keinen Eindruck mehr machen. Nimmt man nur einen einzelnen leuchtenden Punkt, ſo können die Bilder leicht mit einander verwechſelt werden: will man ſie klar unterſcheiden, ſo muß man Gegenſtände wählen, deren Seiten verſchiedene Färbung beſitzen, wie dies in Fig. 162 angedeutet iſt. Dadurch, daß man die gegenüberſtehenden Wände eines Saales durch gute, parallele Spiegel bildet, wachſen die Dimenſionen deſſelben ſcheinbar bis ins Unbegrenzte.

Fig. 164. Rechtwinklige Spiegel.

Digitized by Google

Sind zwei Planſpiegel unter einem Winkel gegen einander geneigt, ſo iſt die Zahl der Bilder eines Gegenſtandes eine beſchränkte und hängt von der Größe des Neigungswinkels ab: alle dieſe Bilder liegen in der Peripherie eines Kreiſes, deſſen Mittelpunkt in die Durchſchnittslinie der

Fig. 165. Spiegel unter einem Winkel von 60°.

Fig. 166. Spiegel unter einem Winkel von 45°.

Spiegelflächen fällt, und deſſen Halbmeſſer gleich dem Abſtande des Gegenſtandes von dieſer Durchſchnittslinie iſt. Aus Fig. 163—166 iſt die Vertheilung der Bilder zu erſehen, wenn der Neigungswinkel 90°, 60° und 45° beträgt, und zwar entſtehen im erſten Falle drei, im zweiten fünf und im dritten ſieben Bilder.

Fig. 167. Symmetriſche Figuren im Kaleidoſkop

Auf dieſem Principe beruht auch das bekannte von Brewſter erfundene Kaleidoſkop: in einer Pappröhre befinden ſich drei gleich breite Streifen aus Spiegelglas, welche mit der ſpiegelnden Fläche nach Innen zu einem gleichſeitigen Prisma zuſammengeſetzt ſind. Am unteren Ende iſt die Röhre durch zwei parallele Glasplatten geſchloſſen, von denen die innere durchſichtig, die äußere matt

Digitized by Google

geschliffen ist, und zwischen denen sich verschiedene Gegenstände, als verschiedenfarbige Glasstückchen, Perlen, Federn, feine Drähte, Moosästchen u. dergl. befinden. Sieht man nun durch eine Oeffnung im oberen Deckel, so erblickt man einige dieser Gegenstände direct, zugleich aber ihre Bilder in den Spiegeln, die sich zu regelmäßigen, dreizackigen Sternen gruppiren müssen. Durch Drehen der Röhre werden immer andere Sterne sichtbar, sodaß die Mannigfaltigkeit unerschöpflich ist.

Sehr wichtige Verwendung finden die Spiegel bei mehreren wissenschaftlichen Instrumenten, wie beim Sextanten, der zur Bestimmung des Bogenabstandes zweier entfernter Punkte, etwa zweier Sterne dient, dem Goniometer zur Messung der Winkel an Krystallen, dem Heliostaten, durch welchen das Licht der Sonne in bestimmter Richtung reflectirt wird, und anderen, deren Besprechung uns aber hier zu weit von unserem Zwecke, der Darstellung der Erscheinungen der Natur, ablenken würde.

§ 3. Bilder in sphärischen Spiegeln.

Fallen Lichtstrahlen auf einen gekrümmten Spiegel, so behält das Reflexionsgesetz für sie immer seine Gültigkeit: man muß sich nur durch jeden Punkt, in welchem ein Strahl die Spiegelfläche trifft, oder durch den Einfallpunkt des Strahles eine Ebene gelegt denken, welche die Fläche des Spiegels berührt, und auf dieser Ebene im Einfallspunkte eine Senkrechte errichten, die man als eine Normale auf der Spiegelfläche bezeichnet. Mit dieser Normalen liegt der einfallende und der zurückgeworfene Strahl in einer Ebene und beide bilden mit ihr gleiche Winkel. Gehen Strahlen divergirend von einem Punkte aus und treffen sie auf eine gekrümmte Fläche, so wird durch die Reflexion ihre Divergenz, je nach der Stärke und Richtung der Krümmung, entweder erhöht oder verringert, ja die Strahlen können sogar in parallele oder convergente Richtungen gebracht werden. Daher zeigen die Bilder bei gekrümmten Spiegeln sehr verschiedene Lage, Größe und Gestalt, je nach der Beschaffenheit der Krümmung einerseits, und nach der Stellung des Gegenstandes andererseits.

Untersuchen wir jetzt diese Erscheinungen bei Spiegeln, deren Fläche ein Theil einer Kugeloberfläche ist, und die man *sphärische Spiegel* nennt, so sind zwei Fälle zu unterscheiden: entweder ist der Spiegel *concav*, ein *Hohlspiegel*, wenn die Innenseite der Kugel reflectirt,

Digitized by Google

oder er ist convex, wenn die Außenseite spiegelnd ist. Die spiegelnde Fläche sei durch einen Kreis begrenzt, so giebt es in ihr immer einen Punkt, der von allen Punkten der Grenzlinie gleichen Abstand hat und Spiegelmittelpunkt heißt: die Verbindungslinie dieses Punktes mit dem Mittelpunkte der Kugel, von der der Spiegel ein Theil ist, nennt man die Axe des Spiegels. Zu genauen Untersuchungen darf man nur Metallspiegel anwenden, da bei Spiegeln aus Glas, dessen Rückseite be-

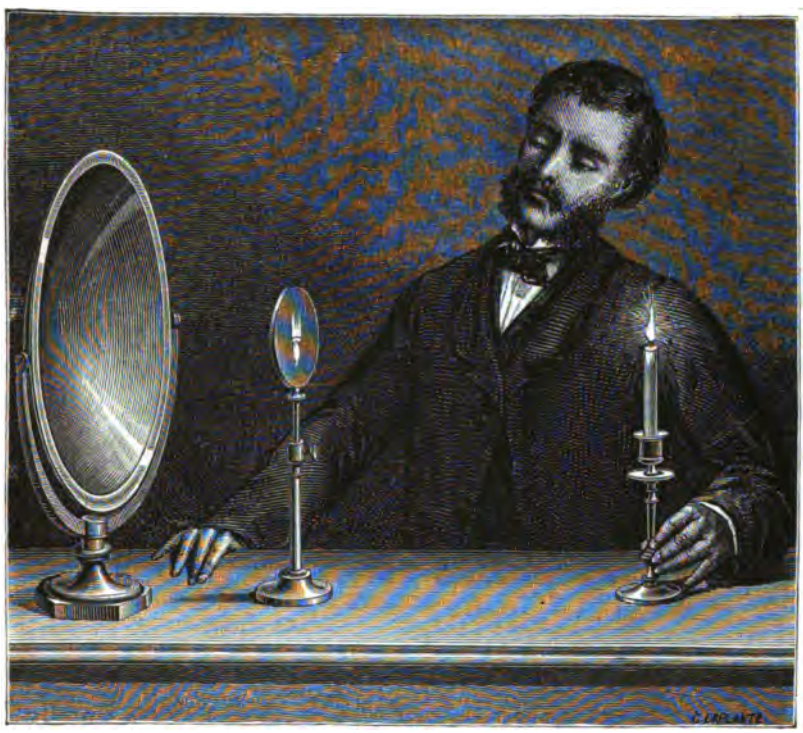


Fig. 168. Verkehrtes und verkleinertes Bild durch einen Hohlspiegel.

legt ist, die doppelte Reflexion an der Vorderseite des Glases und am Belege sehr störend wirkt.

Um nun die Gesetze der Reflexion bei einem Hohlspiegel kennen zu lernen, stellen wir vor demselben in seiner Axe einen leuchtenden Körper, etwa die Flamme einer Kerze auf, während im Uebrigen das Zimmer, in dem wir uns befinden, dunkel ist. Ist zunächst der Abstand der Flamme vom Spiegel größer, als der Kugelradius, so gelingt es leicht, nach einigen Versuchen einen Schirm in eine solche Stellung vor dem Spiegel zu bringen, daß das Bild der Flamme deutlich auf ihm erscheint:

Digitized by Google

dasselbe ist verkehrt und kleiner, als der Gegenstand, seine Entfernung vom Spiegel aber geringer, als der Kugelradius (Fig. 168). Entfernt man nun die Kerze vom Spiegel, so muß man, um ein scharfes Bild zu erhalten, den Schirm näher bringen; und zwar muß man ihn immer mehr einem Punkte nähern, der genau in der Mitte zwischen dem Kugelmittelpunkte und dem Mittelpunkte des Spiegels liegt und Brennpunkt heißt. Rückt man dagegen die Kerze näher an den Spiegel heran, so entfernt sich das Bild, indem es verkehrt bleibt, immer weiter vom Spiegel, ist aber immer noch kleiner als der Gegenstand, bis die Kerze im Mittelpunkte der Kugel angelangt ist. In diesem Augenblicke sind

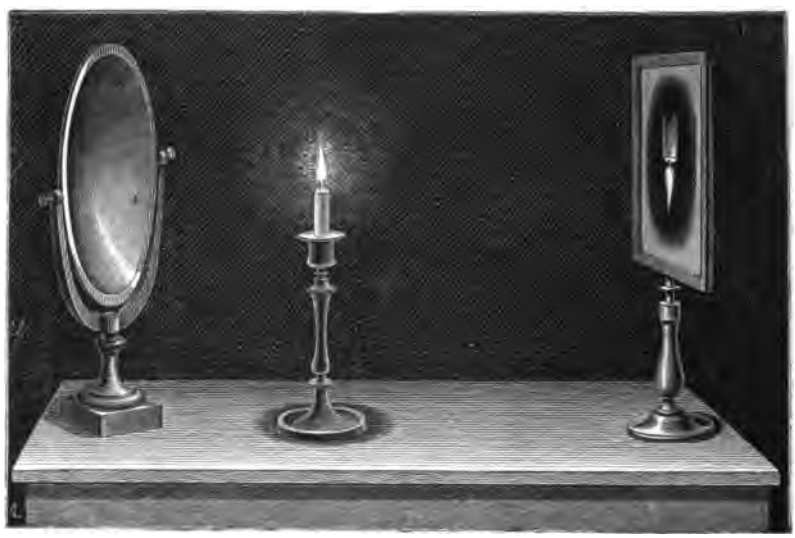


Fig. 169. Verkehrtes und vergrößertes Bild durch einen Hohlspiegel.

die Entfernungen von Bild und Gegenstand gleich, und ebenso auch ihre Größe; das Bild verschwimmt mit dem Gegenstande, wenn man denselben nicht ein wenig zur Seite rückt, in welchem Falle man sein Bild auf einem Schirme neben ihm erblicken kann: dasselbe ist ihm an Größe gleich, aber verkehrt. Rücken wir die Kerze noch etwas näher, so müssen wir jetzt den Schirm weiter entfernen, um ein deutliches Bild auf ihm zu erhalten, welches nunmehr aber vergrößert ist (Fig. 169) und immer wächst und sich weiter entfernt, je mehr wir die Kerze nähern, bis es uns schließlich nicht mehr möglich ist, dasselbe auf einem Schirme aufzufangen. Befindet sich der leuchtende Gegenstand im Brennpunkte selbst,

Digitized by Google

so wird sein Licht in parallelen Strahlen bis in unendliche Entfernung hinausgeworfen.

Bis zu dieser Grenze heran existirten die Bilder wirklich im Raume an der Stelle, wo sich die Strahlen, die von einem Punkte ausgehen, durchschneiden, nachdem sie vom Spiegel wieder convergent zurückgeworfen sind. Man kann diese Bilder, die den Körper in Gestalt und Farbe getreu wiedergeben, wenn der Spiegel gut ist, auf einem Schirme auffangen und dort betrachten, ohne daß man nöthig hätte in den Spiegel selbst hineinzusehen; daher nennt man sie *reelle* oder *physische Bilder*. Anders dagegen, wenn man den Abstand noch kleiner macht, als die Entfernung des Brennpunktes oder die sogenannte *Brennweite*: das Bild läßt sich nun nicht mehr auf einem Schirme auffangen, sondern man kann es nur erblicken, wenn man in den Spiegel selbst hinein sieht, hinter dessen Fläche es zu liegen scheint (Fig. 170). Dieses Bild, welches ein *virtuelles* oder *geometrisches Bild* heißt, ist aufrecht und größer, als der Gegenstand, es nimmt aber an Größe ab und nähert sich der Spiegelfläche, je mehr der Gegenstand von der vorderen Seite an dieselbe herangerückt wird; brächte man den Gegenstand bis an die Fläche selbst heran, so würde sein Bild ihm genau ebenso gleichen, wie bei einem Planspiegel. Will man über diese Erscheinungen in's Klare kommen, so ist es nothwendig, daß man den Weg einiger Strahlen verfolgt. Fällt zunächst ein Strahl auf den Spiegel, nachdem er durch den Mittelpunkt der Kugel gegangen ist, so trifft er die Fläche unter einem rechten Winkel, weil die Kugelradien auf der Fläche senkrecht stehen, und wird daher in demselben Wege, in welchem er anlangte, wieder zurückgeworfen, geht also durch den Kugel-

Fig. 170. Aufrechtes, vergrößertes Bild in einem Hohlspiegel.

Digitized by Google

mittelpunkt wieder zurück. Ein solcher Strahl heißt ein Hauptstrahl. Trifft dagegen ein Strahl in irgend einer anderen Richtung SI (Fig. 171) auf die Spiegelfläche, so verbinde man den Einfallspunkt I mit dem Kugelmittelpunkte C: diese Verbindungslinie ist als Einfallsloth anzusehen und der zurückgeworfene Strahl IR wird daher in der Ebene, welche durch SI und IC gelegt werden kann, so zurückgeworfen, daß der Winkel CIR, den er mit dem Einfallslothe CI bildet, dem Winkel SIC gleich ist. In solcher Weise kann man sich leicht Rechenschaft über den Verlauf jedes einzelnen Strahles geben.

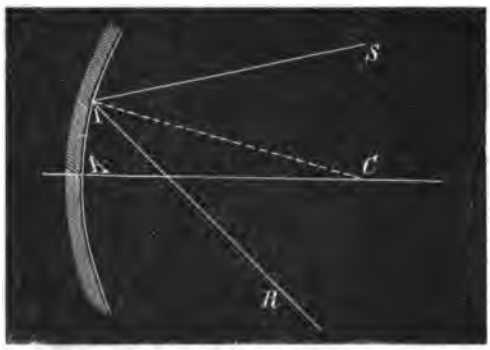


Fig. 171. Weg eines Strahles, der von einem Hohlspiegel zurückgeworfen wird.

Besonders wichtig sind noch diejenigen Strahlen, welche parallel zur Axe CA auf den Spiegel treffen, und welche man als Parallelstrahlen bezeichnet (Fig. 172). Als solche kann man alle diejenigen Strahlen ansehen, welche von einem auf der Axe liegenden sehr weit entfernten Körper, etwa der Sonne, einem Sterne oder auch einem entfernten irdischen Körper ausgehen. Treffen solche Strahlen den Spiegel in nicht zu großer Entfernung von seinem Mittelpunkte A, so läßt sich auf rein geometrischem Wege zeigen, daß sie alle die Axe ziemlich genau in einem Punkte F durchschneiden, welcher in der Mitte zwischen dem Kugelmittelpunkte C und dem Mittelpunkte des Spiegels A liegt. In diesem Punkte, welcher der Brennpunkt des Spiegels heißt, entsteht also ein Bild des entfernten Körpers: denn die reflectirten Strahlen werden so in unser Auge gelangen, als ob sie nur von diesem Punkte ausgingen. Die Vereinigung der parallelen Strahlen im Brennpunkte findet zwar nicht in aller Schärfe statt, die Annäherung ist aber um

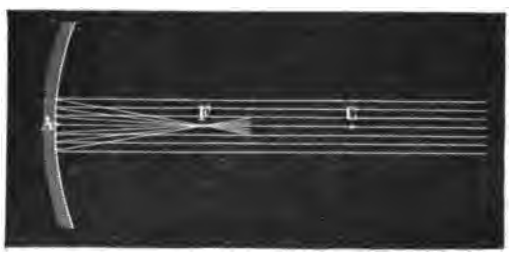


Fig. 172. Reflexion der Parallelstrahlen bei einem Hohlspiegel. Brennpunkt.

Digitized by Google

so genauer, je geringer sein Gesichtsfeld, d. h. die Größe seiner Fläche im Vergleich mit seinem Radius ist. Sollen die Bilder, die entstehen, sehr scharf sein, so darf der Winkel, den zwei Radien, die vom Punkte C nach zwei gegenüberliegenden Punkten im Umfange der Spiegelflächen gezogen sind, die Größe von 8—10° nicht übersteigen.

Da ein sphärischer Spiegel überall gleiche Krümmung hat, so werden auch andere Strahlen, die unter sich parallel sind, aber in einer anderen Richtung, als der der Axe auftreffen, sich in einem Punkte schneiden, welcher in der Mitte des Radius liegt, der ihrer Richtung parallel ist. Man könnte diese Punkte als secundäre Brennpunkte und jeden Radius als eine secundäre Axe bezeichnen.

Die Figuren 173 und 174 lassen den Weg erkennen, den die Strahlen zurücklegen, die von irgend einem Punkte der Axe ausgehend auf den Spiegel treffen. Für alle solche Strahlen, die unter verschiedenen Winkeln auf die Spiegelfläche fallen, läßt sich geometrisch nachweisen, daß sie sich nahezu in einem und demselben Punkte der Axe wieder vereinigen, oder daß sie so von der Spiegelfläche divergiren, als kämen sie von einem Punkte, der in der Verlängerung der Axe hinter dem Spiegel liegt, und zwar bestimmt sich die Lage des Bildes nach der Theorie ebenso, wie wir sie durch den Versuch kennen gelernt haben. Befindet sich zuerst der leuchtende Punkt in S (Fig. 173), jenseits des Kugelmittelpunktes, so wird ein Strahl SI in der Richtung Is zurückgeworfen und er schneidet dann die Axe in s; durch denselben Punkt s, der zwischen dem Kugelmittelpunkte und dem Brennpunkte liegt, gehen aber auch alle anderen Strahlen, die von S ausgehen, um so genauer, je näher am Mittelpunkte sie den Spiegel treffen, sodaß in s ein deutliches Bild des Lichtpunktes S entsteht. Nur wenn die Fläche des Spiegels sehr ausgedehnt ist, werden die Strahlen, welche die entfernteren Punkte desselben treffen, nicht genau durch s zurückgeworfen, sodaß in diesem Falle das Bild an Schärfe verliert: vor der Hand wollen wir

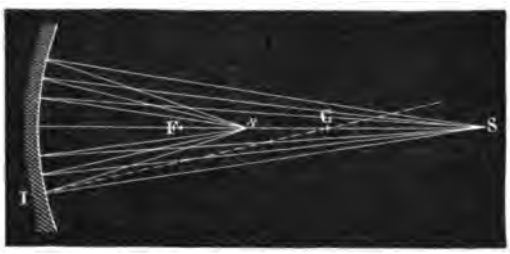


Fig. 173. Strahlen, die von einem Punkte in der Axe eines Hohlspiegels ausgehen und sich in der Axe wieder vereinigen.

Digitized by Google

aber diese kleine Abweichung unberücksichtigt lassen. Rückt der leuchtende Punkt in den Kugelmittelpunkt C, so treffen alle Strahlen den Spiegel rechtwinkelig und werden daher in derselben Richtung wieder zurückgeworfen, sodaß sie sich im Mittelpunkte selbst wieder vereinigen und das Bild mit dem leuchtenden Punkte zusammenfällt. Legen wir den leuchtenden Punkt noch näher an den Spiegel heran, z. B. in den Punkt s, wo sich vorher die von S ausgehenden Strahlen vereinigten, so ist es klar, daß jeder Strahl, der von s ausgeht, genau denselben Weg zurücklegt, wie einer der Strahlen von S, nur in umgekehrter Richtung: das Bild von s erscheint daher in S. Jedem Punkte der Axe, welcher nur jenseits des Brennpunktes liegt, entspricht also ein zweiter Punkt in solcher Weise, daß die Lichtstrahlen, die von dem einen ausgehen, sich im andern vereinigen, und umgekehrt. Zwei solche Punkte, die in der erwähnten Beziehung zu einander stehen, heißen *conjugirte* Punkte: der eine derselben liegt immer zwischen Brennpunkt und Kugelmittelpunkt, der andere jenseits des Kugelmittelpunktes. Der Kugelmittelpunkt ist sich selbst conjugirt, für den Brennpunkt aber fällt der conjugirte Punkt in unendliche Entfernung, da die Strahlen, welche vom Brennpunkte ausgehen, parallel mit der Axe zurückgeworfen werden.

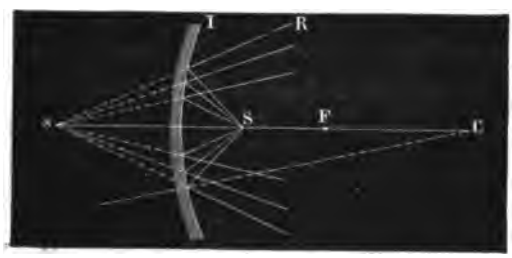


Fig. 174. Virtuelles Bild eines Punktes in der Axe eines Hohlspiegels.

Rückt der leuchtende Punkt S noch näher an den Spiegel heran, sodaß er innerhalb der Brennweite auf der Axe liegt (Fig. 174), so wird ein Strahl SI, der von ihm ausgeht, in der Richtung IR zurückgeworfen und entfernt sich immer weiter von derselben. Der Strahl schneidet daher die Axe nicht, weshalb auch kein reelles Bild entstehen kann, wie wir schon früher durch den Versuch gesehen hatten. Denkt man sich aber den Strahl IR rückwärts verlängert, so wird er die Verlängerung der Axe in einem bestimmten Punkte s schneiden: und dasselbe wird auch von allen anderen Strahlen gelten, die von S ausgehen. Befindet sich daher unser Auge vor dem Spiegel, so werden alle Strahlen dasselbe so treffen, als kämen sie vom Punkte s: wir sehen also ein

Digitized by Google

Bild von S in s, dieses Bild ist aber kein reelles, weil sich die Strahlen nicht wirklich schneiden, sondern ein virtuelles, wie bei den ebenen Spiegeln.

Hat man sich auf diese Weise über die Lage der Bilder einzelner Punkte Rechenschaft gegeben, so hat es auch keine Schwierigkeit, die Lage des Bildes für Gegenstände zu bestimmen, die etwas ausgedehnter sind; und man wird leicht sehen, warum dieselben bald reell und verkehrt und bald virtuell und aufrecht, bald vergrößert und bald verkleinert erscheinen. Will man z. B. die Lage des Bildes von AB (Fig. 175) wissen, so zieht man von A aus den Hauptstrahl AC, der in sich selbst, sowie den Parallelstrahl, der durch den Brennpunkt F zurückgeworfen wird, so wird im Punkte a, in welchem sich beide schneiden das Bild von A entstehen: in gleicher Weise findet man das Bild von B in b, sodaß also die Linie ab das Bild von AB darstellt. Man sieht, daß dasselbe reell, verkehrt und verkleinert ist. Wäre ab der Gegenstand, so würde AB sein Bild sein müssen. Ist dagegen der leuchtende Körper AB dem Spiegel näher gerückt, als der Brennpunkt, so kann man genau dieselbe Construction wieder anwenden: es wird sich dann aber der Hauptstrahl und der Parallelstrahl von A nicht wirklich schneiden, sondern beide werden von einem Punkte a hinter dem Spiegel auszustrahlen scheinen, und dadurch wird das virtuelle, aufrechte und vergrößerte Bild ab entstehen (Fig. 176).

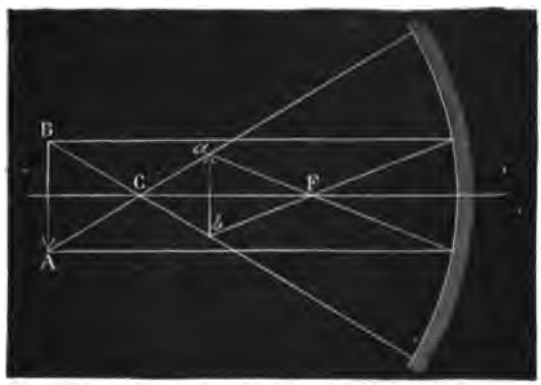


Fig. 175. Reelles Bild eines Gegenstandes vor dem Hohlspiegel.

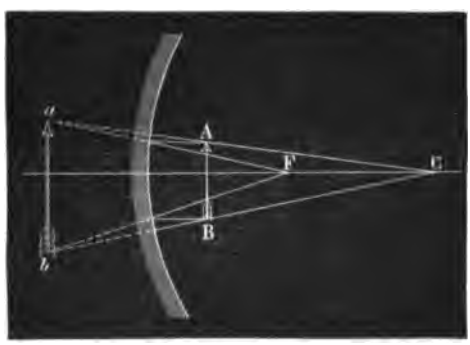


Fig. 176. Virtuelles Bild eines Gegenstandes im Hohlspiegel.

Digitized by Google

Bei den erhabenen oder convexen sphärischen Spiegeln sind die Bilder stets virtuell, weil die Strahlen, aus denen ein einfallendes Lichtbündel

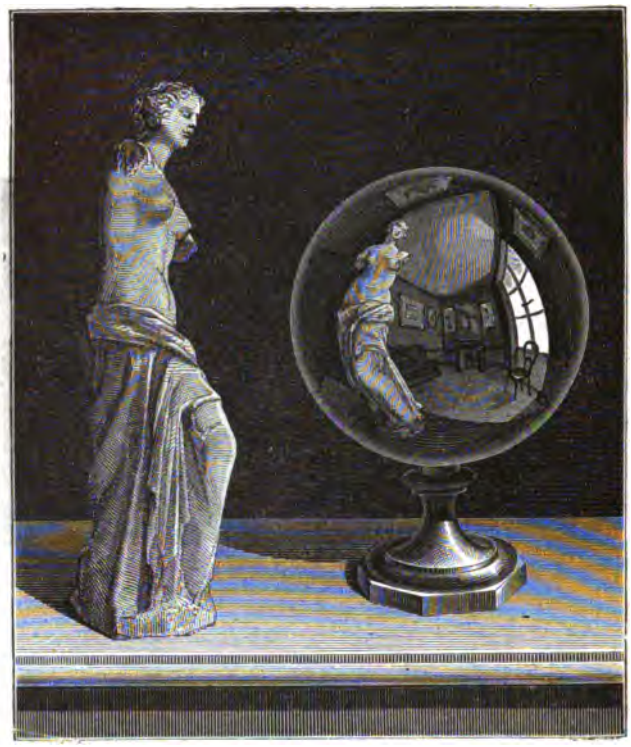


Fig. 177. Aufrechtes virtuelles Bild in erhabenen sphärischen Spiegeln.

besteht, nach der Reflexion divergiren müssen, wie man sich durch eine Zeichnung leicht überzeugen kann. Denn gehen vom Punkte A (Fig. 178) Lichtstrahlen aus, so kann man auch hier wieder den Weg des Hauptstrahles, der nach dem Kugelmittelpunkte C hin gerichtet ist und in sich selbst zurückgeworfen wird, und des Parallelstrahles, der so zurückgeworfen wird, als käme er von einem Punkte F, welcher auf der Axe in der Mitte zwischen C und der Spiegelfläche liegt,

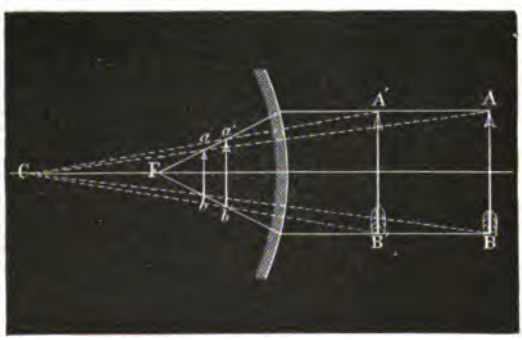


Fig. 178. Weg der Strahlen bei erhabenen sphärischen Spiegeln.

Digitized by Google

verfolgen. Beide divergiren ſo, als kämen ſie von einem Punkte a hinter dem Spiegel: a iſt alſo das virtuelle Bild von A, wie b von B. Rückt man den Gegenſtand AB näher heran, z. B. nach A'B', ſo werden die Parallelſtrahlen ihre Lage beibehalten, die Hauptſtrahlen aber werden ſteiler, ſodaß das Bild in a'b' fällt: es liegt alſo der Spiegelfläche näher und iſt größer, je näher der Gegenſtand an den Spiegel heranrückt. Iſt daher die ſpiegelnde Fläche verhältmäßig groß, wendet man z. B. volle Kugeln an, wie wir ſie häufig in den Gärten aufgeſtellt finden, ſo erleidet die Geſtalt naher Gegenſtände auffällige Verzerrungen, indem diejenigen Partieen, die von der Spiegelfläche weiter entfernt ſind, Bilder geben, die ſtärker verkleinert ſind und gegen die ſpiegelnde Fläche weiter zurücktreten (Fig. 177).

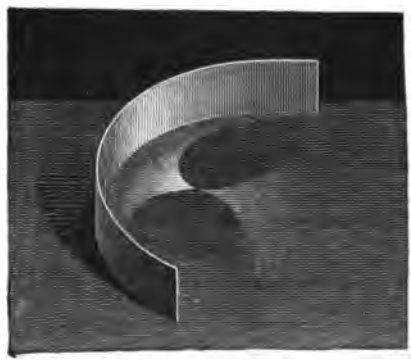


Fig. 179. Brennlinie.

Wir haben ſchon mehrfach angedeutet, daß ſich die zurückgeworfenen Strahlen nur dann ziemlich genau in einem Punkte ſchneiden, wenn ſie nicht weit vom Mittelpunkte des Spiegels auf ſeine Fläche treffen, und daß man deshalb den ſphäriſchen Hohlſpiegeln niemals eine zu große Ausdehnung geben darf. Iſt dieſe Bedingung nicht erfüllt, ſo ſchneiden ſich zwar die Strahlen, welche parallel zur Axe in geringer Entfernung vom Mittelpunkte auftreffen, im Brennpunkte: je weiter wir aber den einfallenden Strahl von der Mitte entfernen, deſto weiter rückt auch der Durchſchnittspunkt der zurückgeworfenen Strahlen auf der Axe zurück, die aufeinanderfolgenden Strahlen ſelbſt aber ſchneiden ſich ſeitwärts von der Axe, ſodaß ſich nicht alles Licht in

Fig. 180. Brennlinie auf der Oberfläche einer Flüſſigkeit aufgefangen.

Digitized by Google

einem Punkte concentrirt, sondern daß sich aus den Strahlen eine Fläche bildet, welche im Brennpunkte in eine Spitze ausläuft und dort am stärksten erleuchtet ist. Hält man vor den Hohlspiegel ungefähr in der Richtung der Axe ein Blatt Papier, so erscheint auf diesem der Durchschnitt jener Fläche als eine erleuchtete Linie, welche man als Brennlinie bezeichnet (Fig. 179).

Zur Herstellung solcher Brennlinien kann man auch cylindrische Hohlspiegel, halbkreisförmige Metallränder oder auch die inneren Flächen von Gläsern und Tassen verwenden. Füllt man z. B. ein Glas zum Theil mit einer undurchsichtigen Flüssigkeit, etwa Milch, Kaffe, am besten Tinte, und setzt es den Sonnenstrahlen aus, welche schräg von oben gegen die Wand des Glases fallen, so erscheint die Brennlinie sehr scharf auf der Oberfläche der Flüssigkeit (Fig. 180).

§ 4. Bilder in cylindrischen und kegelförmigen Spiegeln. Unregelmäßig reflectirtes Licht.

Convexe oder concave cylindrische Spiegel werfen das Licht so zurück, daß die Dimensionen des gespiegelten Gegenstandes in der Längsrichtung

Fig. 181. Cylindrische Spiegel. Anamorphose.

des Cylinders nicht verändert sind, daß sich aber die Größenverhältnisse in der darauf senkrechten Richtung, also in der Richtung der Kreisschnitte

Digitized by Google

ändern. Die Strahlen, welche längs einer und derselben Seite des Cylinders zurückgeworfen werden, verfolgen denselben Weg, als wenn sie von einem ebenen Spiegel reflectirt würden; diejenigen dagegen, welche in demselben Kreisschnitte auftreffen, folgen denselben Gesetzen, als wenn sie von einem sphärischen Spiegel zurückgeworfen würden. Ist der Cylinder convex, so wird das Bild immer in seiner Breitenausdehnung

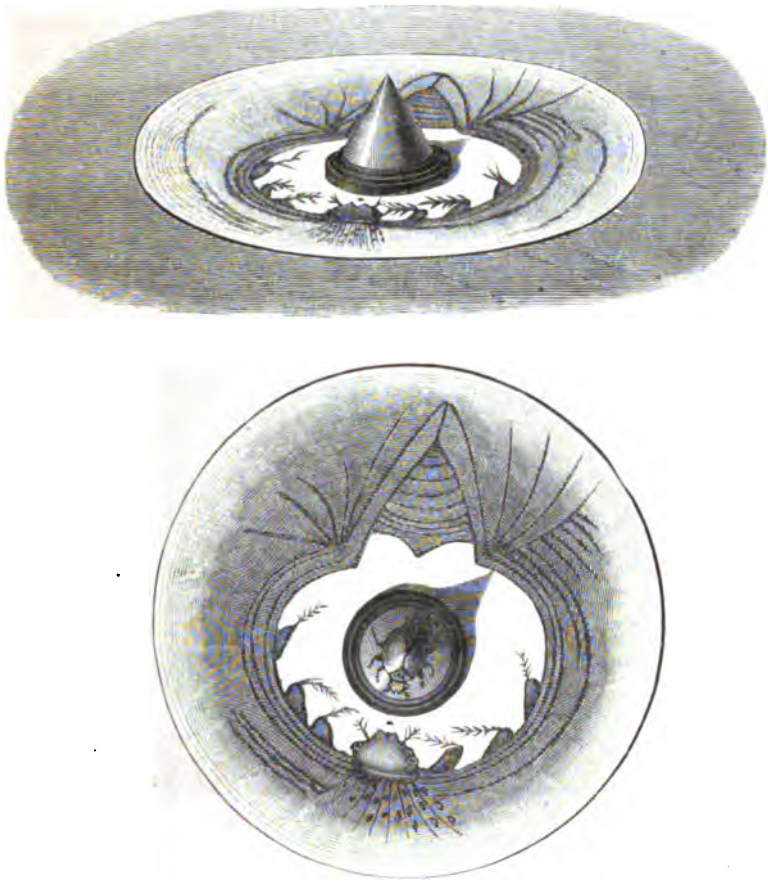


Fig. 182. Kegelförmige Spiegel. Anamorphose.

verkürzt erscheinen; ist er dagegen concav, so erscheint es verkürzt oder erweitert, je nach der Stellung des Gegenstandes zum Spiegel.

In ähnlicher Weise erscheinen die Bilder, welche durch kegelförmige Spiegel hervorgebracht werden in der Richtung des Umfanges der Kreise verzerrt; da aber die Krümmung der Kreise nach der Spitze hin zunimmt, so wird diese Verzerrung um so größer werden, je mehr man sich der

Digitized by Google

Spitze nähert. Auch hier besteht die Verzerrung in einer Verkürzung, wenn der kegelförmige Spiegel convex ist.

Auch in diesen Fällen erfolgt die Reflexion des Lichtes ganz nach denselben Gesetzen, welche wir für die Planspiegel aufgezeichnet haben, sodaß es möglich geworden ist, Zeichnungen zu entwerfen, welche direct betrachtet ganz eigenthümlich ungestaltete Formen besitzen, welche aber in einem cylindrischen oder kegelförmigen Spiegel Bilder geben, welche irgend einen Gegenstand leidlich darstellen. Man nennt diese Zeichnungen Anamorphosen (Fig. 181 und 182).

Wird das Licht von einer durchsichtigen Spiegelplatte zurückgeworfen, so erscheinen die Bilder etwas verblaßt, da ein großer Theil des auffallenden Lichtes durch die Platte hindurch geht, ohne reflectirt zu werden: aus diesem Grunde belegt man die Spiegelplatten mit Zinnamalgam oder auch mit Silber, wodurch die Bilder ebenso scharf werden, als

Fig. 183. Stellung des Spiegels zur Hervorbringung von Geistererscheinungen.

wenn sie durch die polirte Oberfläche eines undurchsichtigen Körpers reflectirt würden. Unbelegte Spiegel dagegen wendet man an, um mancherlei merkwürdige Effecte zu erzielen: so sind dieselben seit einiger Zeit in Paris in Gebrauch, um Geistererscheinungen, wie sie im modernen französischen Drama am Platze sind, darzustellen (Tafel IV). Die Einrichtung ist hierbei folgende: quer über die Bühne hinweg geht ein nicht belegter Spiegel, welcher das Bild einer in geeigneter Weise costümirten Person, die sich in einer Versenkung befindet und durch ein starkes Licht

Digitized by Google

Geiſter-Erſcheinungen.

Digitized by Google

LIBRARY
OF THE
UNIVERSITY
OF
CALIFORNIA

Digitized by Google

grell beleuchtet wird, reflectirt. Ist der Zuschauerraum und auch die Bühne matt erleuchtet, so sehen die Zuschauer das Spiegelglas selbst nicht, sondern nur das Bild der in ihm gespiegelten Person, sowie auch die Personen, welche sich hinter dem Spiegel auf der Bühne befinden (Fig. 183). Dadurch, daß man den Spiegel neigen muß, erhält das Bild eine Stellung, welche der Gleichgewichtslage nicht ganz entspricht: ein Uebelstand, der sich besonders für die seitwärts sitzenden Zuschauer bemerklich macht.

Ist die Oberfläche eines Körpers vollständig gut polirt, so werden alle Strahlen, die auf sie fallen, nach den Gesetzen der Reflexion zurückgeworfen und es entsteht von jedem Gegenstande je nach der Form der Oberfläche ein getreues oder verzerrtes, vergrößertes oder verkleinertes Bild, das vor oder hinter der Spiegelfläche zu liegen scheint. Die Fläche selbst scheint gar keine Strahlen auszusenden und wird unserem Auge um so weniger sichtbar, je besser ihre Politur ist. So sehen wir in einem matt erleuchteten Zimmer die Spiegel nicht selbst, sondern nur die darin gespiegelten Gegenstände; und so müßten z. B. vom Monde aus gesehen die Meere dunkel erscheinen, und nur an der Stelle, wo sich das Spiegelbild der Sonne befindet, einen hell leuchtenden Punkt zeigen. Daß uns der Mond als eine in allen Punkten leuchtende Fläche erscheint, ist ein Beweis dafür, daß sich auf ihm keine größeren Wasserflächen befinden können.

Fig. 184. Schiefauffallendes Licht, welches von einem Blatte Papier reflectirt wird.

Wenn uns gleichwohl Spiegelflächen selbst sichtbar werden, so liegt das daran, daß sie nicht vollständig glatt sind, sondern einen Theil des

Digitized by Google

Lichtes nach den verschiedenen Seiten hin zerstreuen, wie dies rauhe Körper in hohem Grade thun. Läßt man das Sonnenlicht auf ein weißes Blatt Papier fallen, so sieht man die Fläche desselben in ihrer ganzen Ausdehnung hell erleuchtet, auf welcher Seite man sich auch aufstellen mag: die Strahlen der Sonne werden nach allen Seiten hin zerstreut, das Licht wird *diffuses* Licht. Stellt man denselben Versuch mit einer Kerzenflamme an, und hält man das Blatt so, daß man darüber hinwegsehend die Flamme nur wenig über seine Fläche erhoben erblickt, so bemerkt man im Blatte selbst ein zwar schwaches, aber doch deutliches Spiegelbild der Flamme: wenn die Strahlen also sehr schräg auf die rauhe Fläche des Papiers fallen, so wird eine Anzahl desselben reflectirt, die Menge des diffusen Lichtes aber nimmt ab (Fig. 184).

Wenn man sich des Ausdruckes bedient, daß das diffuse Licht unregelmäßig reflectirtes Licht sei, so soll dies nicht heißen, daß die Strahlen dabei anderen Reflexionsgesetzen folgen, als wir oben auseinander gesetzt haben; die Unregelmäßigkeit besteht nur darin, daß die Unebenheiten nach den verschiedensten Richtungen hin geneigt sind und daher auch das Licht unter den verschiedensten Winkeln zurückwerfen (Fig. 185). Blickt man in sehr schräger Richtung gegen eine solche Fläche, so verbergen sich die Rauhigkeiten hinter einander, die Zahl der Flächenelemente, welche in die Hauptrichtung der Oberfläche fallen, wird immer größer, und dadurch gewinnt das regelmäßig reflectirte Licht an Intensität.

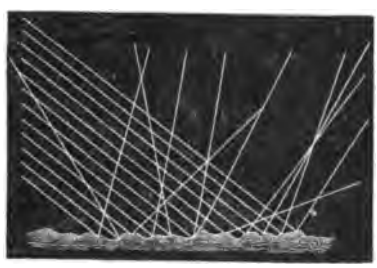


Fig. 185. Unregelmäßige Reflexion des Lichtes an einer rauhen Oberfläche.

Es ist bekannt, daß ein und derselbe Stoff bald spiegeln, bald unregelmäßig zurückwerfen kann, je nach dem Grade seiner Politur: das polirte Glas wird zum Spiegel, das mattgeschliffene sendet nur diffuses Licht aus, und eben dasselbe gilt vom Marmor und anderen Steinen, vom Horn, Elfenbein, von manchen Holzarten und vielen anderen Körpern. Die Stärke, mit welcher das Licht reflectirt wird, hängt bei gleichem Grade der Politur eines Theils von den Stoffen ab, an welche die Spiegelflächen angeschliffen sind, anderen Theils von dem Winkel unter welchem das Licht auffällt. So sendet bei einem Einfallswinkel

Digitized by Google

von 50° das Wasser 72, Glas 54, Marmor 60, Quecksilber und Spiegelmetall 70 Procent der auffallenden Strahlen zurück. Wächst der Einfallswinkel, so nimmt die Zahl der reflectirten Strahlen bei den drei zuerst genannten Körpern außerordentlich schnell ab, sodaß sie nur noch 2—3 Procent beträgt, wenn der Winkel einem Rechten nahe gekommen ist, während sie in diesem Falle beim Quecksilber immer noch 60 Procent beträgt. Dunkle Körper reflectiren das Licht in geringem Grade: beim Ruß z. B. zeigt sich gar kein diffuses Licht, und auch die Menge des regelmäßig reflectirten Lichtes ist selbst beim Glanzruße sehr gering.

Viertes Kapitel.

Brechung der Lichtstrahlen.

§ 1. Allgemeine Erscheinungen und Gesetze der Strahlenbrechung.

Taucht man einen geraden Stab mit seiner Spitze in klares Wasser ein, indem man ihm gegen den Wasserspiegel eine geneigte Stellung giebt, so scheint es, als ob das eingetauchte Stück gar nicht mehr die Fort-

Fig. 186. Strahlenbrechung. Scheinbar geknickter Stab.

setzung des oberen Theiles bildete, sondern als ob der Stab an der Stelle, wo er die Wasserfläche durchschneidet, geknickt wäre, das untergetauchte Stück aber erscheint gehoben und verkürzt (Fig. 186). Hält

Digitized by Google

man den Stab senkrecht, oder stellt man sich so, daß man die Neigung desselben nicht bemerkt, sondern daß er unserem Auge aufrecht zu stehen scheint, so verschwindet die Einknickung für unser Auge, und nur die Verkürzung ist noch deutlich vorhanden. Denselben Versuch kann man in gleicher Weise mit einem Bleistifte in einem Glase Wasser ausführen. Stellt man weiter ein leeres Gefäß vor sich auf, und bringt man das Auge in eine Stellung, daß der Boden des Gefäßes durch eine Seitenwand verdeckt ist, so wird der Boden immer mehr sichtbar, je mehr man das Gefäß mit Wasser füllt, ohne daß dabei das Auge aus seiner Lage gebracht wird. Noch auffälliger wird die Erscheinung, wenn man eine Münze auf dem Boden an eine Stelle legt, wo man sie nicht sehen konnte, solange kein Wasser im Gefäße war: beim Einfüllen des Wassers

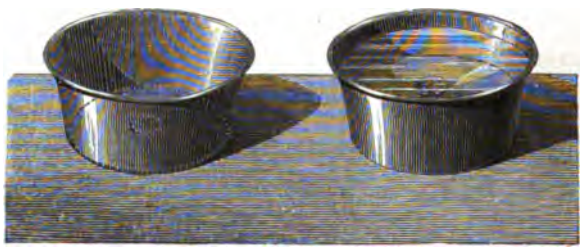


Fig. 187. Strahlenbrechung. Scheinbare Erhebung des Bodens eines Gefäßes.

scheint sich dieselbe immer mehr zu heben und deutlicher hervorzutreten (Fig. 187). Endlich kann man leicht beobachten, daß die Gegenstände, durch eine Wasserfläche betrachtet, vergrößert und in ihren Formen verzerrt erscheinen, sowie daß sie an ganz anderen Stellen sichtbar werden, als wo sie sich in Wirklichkeit befinden. Einen staunenswerthen Anblick gewährt es z. B., wenn man Goldfische in einem kugelförmigen Bassin beobachtet und sieht, wie der Körper dieser kleinen Thiere plötzlich wächst, um sogleich nachher seine natürlichen Dimensionen wieder anzunehmen. Alle diese und viele ähnliche Erscheinungen verdanken ihre Entstehung dem Umstande, daß das Licht, wenn es aus einem durchsichtigen Mittel in ein anderes, aus Wasser oder Glas in Luft übergeht, *seine Richtung ändert*, von seiner Bahn abgelenkt wird und eine neue Richtung einschlägt: ein Vorgang, den man als *Strahlenbrechung* oder *Refraction des Lichtes* bezeichnet.

Wenn das Licht von einem leuchtenden oder erleuchteten Punkte

Digitized by Google

ausgeht, so breitet es sich in gerader Linie aus, solange es in demselben homogenen Mittel bleibt, und auch dann, wenn es in ein neues homogenes Mittel übertritt, verfolgt es seinen Weg in gerader Linie. So weicht auch ein Strahlenbündel, das von einem Punkte des Stabes im ersten Beispiele ausgesendet wird, von seiner geraden Richtung nicht ab, solange es im Wasser verbleibt, und auch in der Luft gelangt es in gerader Linie bis in unser Auge: allein dieser letzte Weg ist durchaus nicht eine Fortsetzung des ersteren, sondern der ganze Weg erscheint als eine gebrochene Linie, die beiden Theile bilden einen Winkel, dessen Scheitelpunkt an der Stelle liegt, wo der Strahl das Wasser verläßt. Dieselbe Erscheinung findet statt bei jedem Uebergange aus einem durchsichtigen Mittel in ein anderes, mag es sich nun um feste, flüssige, oder luftförmige Körper handeln: nur ist die Stärke der Ablenkung verschieden je nach der Natur der Stoffe, in denen die Bewegung des Lichtstrahles erfolgt.

Erscheinungen, wie wir sie oben erwähnten, sind gewiß schon von den ältesten Zeiten her bekannt, da sie sich ja so häufig ungesucht unserer Beobachtung aufdrängen; ebenso kannten auch die alten Astronomen, z. B. Ptolemäus, die Wirkung der Strahlenbrechung in der Atmosphäre, die Abweichung, welche ein Lichtstrahl erfährt, wenn er aus dem leeren Raume in die Luftschichten, die die Erde umgeben, eintritt: den Grund dieser Abweichung und die Gesetze der Strahlenbrechung hat aber erst zu Anfange des siebzehnten Jahrhunderts der holländische Mathematiker Willibrod Snell aufgefunden. Wenden wir uns zur Erläuterung dieser Gesetze, die gewöhnlich mit dem Namen des Philosophen Descartes bezeichnet werden, welcher dieselben genauer untersuchte und ihnen eine schärfere Fassung gab.

Wenn sich ein Lichtstrahl in einem homogenen Mittel in gerader Linie ausbreitet und auf die Fläche trifft, welche ein zweites homogenes und durchsichtiges Mittel begrenzt, so bildet er mit dem Lothe, welches man im Einfallspunkte auf der Grenzfläche errichten kann, einen Winkel, den man *Einfallswinkel* nennt. Der Strahl dringt nun in das zweite Mittel ein, bewegt sich aber in einer etwas geänderten Richtung und bildet daher mit der Verlängerung des Lichtes einen anderen Winkel, den *Brechungswinkel*. Die Beziehung des Einfalls- und Brechungswinkels aufzusuchen muß jetzt unsere Aufgabe sein, die wir mit Hülfe des in Fig. 188 dargestellten Apparates leicht lösen können.

Digitized by Google

Dieser Apparat besteht aus einem aufrechtstehenden Theilkreise, an welchem ein Glasgefäß befestigt ist, das die Form eines kurzen, weiten Cylinders hat, dessen Axe wagrecht liegt und durch den Mittelpunkt des Theilkreises geht. Füllt man dieses Gefäß zur Hälfte mit Wasser oder einer andern Flüssigkeit, so geht das Niveau durch den Mittelpunkt des Kreises und seine Normale fällt mit dem senkrechten Durchmesser desselben zusammen. Im Mittelpunkte des Kreises ist weiter ein drehbares Lineal, eine sogenannte Alhidade, befestigt, welches an seinem oberen Ende eine über das Gefäß überragende Blende, in der sich eine kleine Oeffnung befindet, sowie einen verstellbaren Spiegel trägt, mit Hülfe dessen das Licht der Sonne durch die Oeffnung in der Blende nach dem Punkte im Niveau der Flüssigkeit geworfen werden kann, der sich genau dem Mittelpunkte O des Kreises gegenüber befindet. Hier dringt nun der Strahl in die Flüssigkeit ein und verläßt dieselbe wieder in einem bestimmten Punkte im unteren Theile des Gefäßes. Um die Richtung des austretenden Strahles nun genau bestimmen zu können, ist neben der ersten noch eine zweite Alhidade befestigt, welche an ihrem unteren Ende ebenfalls eine Blende mit kleiner Oeffnung trägt. An jeder Alhidade ist eine Marke befestigt, welche auf dem Theilkreise schleift, sodaß man die Stellung genau ablesen kann.

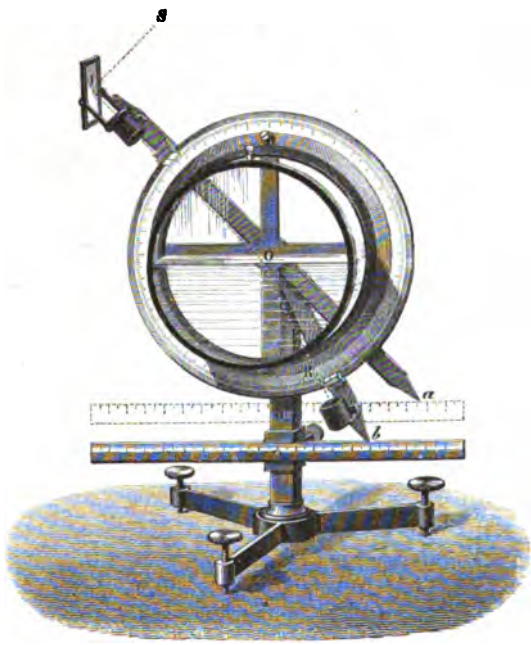


Fig. 188. Experimenteller Nachweis des Brechungsgesetzes.

Stellt man zunächst den Spiegel und die obere Blende so ein, daß der Strahl senkrecht auf den Mittelpunkt der Wasserfläche trifft, so muß man die untere Blende ebenfalls senkrecht unter den Mittelpunkt stellen, wenn das Licht durch ihre Oeffnung hindurch gehen soll: ein senkrecht

Digitized by Google

auffallender Strahl geht also ungebrochen in derselben Richtung weiter. Läßt man nun den auffallenden Strahl einen Winkel mit dem Lothe bilden, so bildet auch der gebrochene Strahl einen Winkel, welcher kleiner ist als der Einfallswinkel und mit diesem zugleich wächst: in allen Lagen aber wird der gebrochene Strahl die Oeffnung der unteren Blende nur dann treffen, wenn die Oeffnungen der beiden Blenden mit dem Einfallslothe in einer Ebene liegen. Hierdurch ist also folgendes zweites Gesetz bewiesen:

Geht ein Lichtstrahl aus einem Mittel in ein anderes über, so wird er in solcher Weise gebrochen, daß der einfallende und gebrochene Strahl mit dem Lothe im Einfallspunkte in einer Ebene liegen.

Um die Beziehung des Einfallswinkels zum Brechungswinkel aufzufinden, läuft jede Alhidade an ihrem unteren Ende in eine Spitze aus, welche sich auf einen Maßstab, der horizontal steht und von unten nach oben verschoben werden kann, einstellen läßt. Beide Spitzen haben vom Kreismittelpunkte gleichen Abstand. Stellt man nun den Apparat so ein, daß ein Strahl, welcher durch die obere Oeffnung eindringt und den Wasserspiegel im Kreismittelpunkte trifft, so gebrochen wird, daß er auch durch die untere Oeffnung frei hindurch geht, und bestimmt man die Entfernungen der Spitzen a und b der beiden Alhidaden vom Einfallslothe, indem man den Maßstab das eine Mal an die Spitze a, das andere Mal an die Spitze b heranschiebt, so findet man durch Versuche, die man beliebig wiederholen kann, daß stets das Verhältniß dieser Längen für ein und dasselbe brechende Mittel von bestimmter Größe ist.

Für diejenigen Leser, denen die Bezeichnungen der Trigonometrie nicht ganz fremd sind, wollen wir noch erwähnen, daß die Entfernung einer Spitze von der senkrechten Linie zugleich als Maß für den Sinus des entsprechenden Winkels gelten kann, daß also das Verhältniß jener Entfernungen mit dem Verhältnisse der Sinus übereinstimmt. Stellt man z. B. diesen Versuch mit Wasser an, so findet man, wie groß man auch den Einfallswinkel nehmen mag, daß die Entfernung der Spitze a vom Lothe 1,335 Mal so groß ist, als die Entfernung der Spitze b: das Verhältniß der Sinus beider Winkel ist also auch gleich 1,335 : 1. Wendet man andere brechende Mittel an, so findet man auch andere Verhältnißzahlen, welche sich aber für dieselben Mittel nicht ändern: diese

Digitized by Google

Verhältnißzahl für irgend zwei Mittel nennt man den Brechungsexponent; derselbe beträgt also für den Uebergang aus Luft in Wasser 1,335, für andere Stoffe hat er andere Werthe. Häufig giebt man für irgend einen Stoff denjenigen Werth an, den man findet, wenn das Licht aus dem luftleeren Raume in diesen Stoff übergeht, und nennt denselben den absoluten Brechungsexponenten. Im Allgemeinen ist der Brechungsexponent größer, je dichter das brechende Mittel ist; doch darf man dies nicht als ein bis in's Einzelne geltendes Naturgesetz ansehen. Gegen die angestellten Versuche könnte man noch den Einwurf erheben, daß das Licht beim Austreten aus der Flüssigkeit und durch die Glaswand eine abermalige Brechung erleiden müsse: da aber der Strahl die Wand des Gefäßes in der Richtung des Radius trifft, also in senkrechter Richtung, so kann eine abermalige Brechung an dieser Stelle nach dem ersten Gesetze nicht stattfinden.

Fassen wir das dritte Gesetz der Strahlenbrechung in Worte, so können wir es etwa folgendermaßen aussprechen:

Beim Uebergange aus einem bestimmten brechenden Mittel in ein zweites bestimmtes Mittel, steht der Sinus des Einfallswinkels zum Sinus des Brechungswinkels in einem bestimmten Verhältnisse, welches man den Brechungsexponenten nennt.

Kennt man somit den Weg eines Lichtstrahles beim Uebergange aus einem ersten Mittel in ein zweites, so ist leicht einzusehen, daß der Strahl beim Uebergange aus dem zweiten in das erste Mittel den umgekehrten Weg einschlagen muß. Wie man den Weg des gebrochenen Strahles construiren kann, wollen wir durch Fig. 189 klar zu machen suchen. Trifft der Strahl RI die Wasserfläche in I, so beschreibe man mit beliebigem Radius einen Kreis um I, welcher die Verlängerung des Strahles in R' schneidet, und fälle von R' auf das durch I gelegte Loth die Senkrechte R'P'. Die Länge von R'P' verkürze man nach dem Verhältnisse des Brechungsexponenten, also beim Uebergange aus

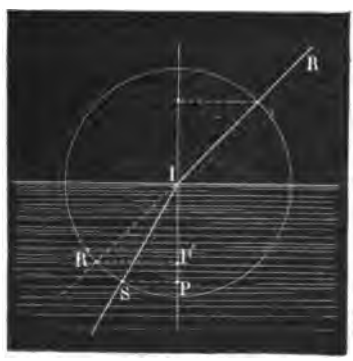


Fig. 189. Brechungsgesetz.

Digitized by Google

Luft in Wasser fast genau im Verhältnisse 4 : 3, und suche auf dem Kreisumfange einen Punkt S, dessen Abstand vom Lothe SP dieser verkürzten Linie gleich ist, was sich durch Construktion eines Rechteckes sehr leicht ausführen läßt, so ist IS die Richtung des gebrochenen Strahles. Käme umgekehrt aus dem Wasser ein Strahl in der Richtung SI, so wird derselbe in der Luft in der Richtung IR weiter gehen: beim Uebergange aus Luft in Wasser wird daher der Strahl dem Einfallslothe zugebrochen, beim umgekehrten Wege dagegen von ihm abgelenkt.

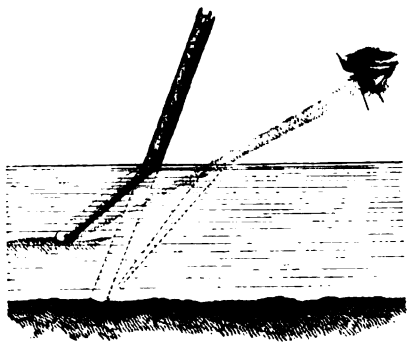


Fig. 190. Erklärung der Brechungserscheinungen.

Durch diese Gesetze finden die obenerwähnten Erscheinungen leicht ihre Erklärung. Soll das Auge das untere Ende eines Stabes erblicken, der in Wasser taucht, so kann dies nur dadurch geschehen, daß von diesem Ende ein Strahlenbündel nach der Oberfläche des Wassers aufsteigt und dort in Luft übergeht: dort aber wird es vom Einfallslothe mehr abgelenkt und kommt dadurch in eine schrägere Richtung, sodaß wir unserem Auge auch eine schiefere Stellung geben müssen, als wenn wir direct nach dem Ende des Stabes sehen könnten, ohne daß Wasser dazwischen liegt. Dasselbe gilt von allen anderen Punkten des Stabes, die unter Wasser tauchen, so daß uns der ganze eingetauchte Theil etwas gehoben und

Fig. 191. Scheinbare Hebung des Bodens der Flüssigkeiten.

Digitized by Google

daher gegen den nichteingetauchten Theil geknickt erscheint (Fig. 190). Auf dieselbe Weise erklärt es sich, daß wir den Grund der Flüssigkeiten gehoben erblicken. Denn selbst wenn man in senkrechter Richtung nach dem Boden eines Gefäßes hinsieht (Fig. 191), so erscheint uns derselbe gehoben, weil in unser Auge niemals ein einzelner Strahl dringt, sondern immer ein Strahlenbündel, welches beim Uebergange aus Wasser in Luft durch die Refraction stärker auseinander gebrochen wird, sodaß es uns, statt vom Punkte O vom näher liegenden Punkte O′ zu kommen scheint.

§ 2. Totale Reflexion. Astronomische Strahlenbrechung.

Wenn Licht aus Wasser in Luft übergehen will, und man die Construktion der Fig. 189 anwendet, so wird, wenn der Strahl SI in sehr schräger Richtung gegen die Oberfläche trifft, und man die Linie SP im Verhältnisse des Brechungsexponenten verlängert, der Fall eintreten, daß diese neue Länge größer als der Radius des Kreises ist. Nunmehr wird es nicht mehr möglich sein, im Umfange des Kreises einen Punkt R′ zu finden, welcher von dem Lothe diesen neugefundenen Abstand hat. Es kann daher das Licht nicht in die Luft hinaus treten, sondern es wird von der Oberfläche nach unten hin zurückgeworfen. Diese Erscheinung nennt man totale Reflexion.

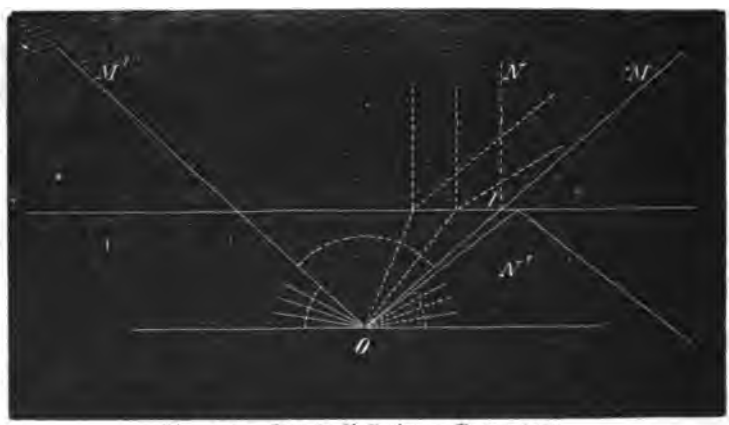


Fig. 192. Totale Reflexion. Grenzwinkel

Befindet sich z. B. unter Wasser ein Punkt, O, von welchem Licht aus geht (Fig. 192), so wird derselbe nach allen Punkten der Grenzfläche, welche die Luft und das Wasser trennt, Strahlen senden. Weicht nun

Digitized by Google

die Richtung eines solchen Strahles von der senkrechten Richtung nicht gar zu sehr ab, so kann man nach Fig. 189 den Weg des austretenden Strahles construiren: derselbe wird mit dem Lothe einen Winkel bilden, welcher größer ist, als derjenige, den der ursprüngliche Strahl mit der Lothlinie bildete, und sich also einem Rechten immer mehr nähert. Untersucht man nun Strahlen, die sich immer weiter von der senkrechten Richtung entfernen, so trifft man schließlich einen Strahl OI, der mit der Lothlinie NN' einen solchen Winkel einschließt, daß die Construktion als Brechungswinkel einen Rechten ergeben würde. Dieser Strahl kann also nicht mehr aus der Wasserfläche hervortreten, sondern verläuft längs derselben: in unser Auge kann er daher nicht gelangen, er ist für uns verschwunden. Gehen wir noch weiter, so tritt nunmehr der obenerwähnte Fall ein, daß die Construktion unmöglich wird: die nun folgenden Strahlen gelangen gar nicht mehr in die Luft, sondern werden an der Oberfläche nach den im vorhergehenden Kapitel angeführten Gesetzen in das Innere der Flüssigkeit wieder zurückgeworfen. Da auch die austretenden Strahlen wenigstens zum Theil reflectirt werden, so bezeichnet man zum Unterschiede die jenseits OI liegenden Strahlen als *total reflectirte* Strahlen. Alle von O ausgehenden Strahlen zer-

Fig. 193. Beobachtung der totalen Reflexion.

Digitized by Google

fallen daher in zwei Classen, solche, welche aus der Oberfläche heraustreten und den Kegel der austretenden Strahlen M'OM bilden, und solche, die eine totale Reflexion erleiden. Der Winkel, jenseits dessen die totale Reflexion beginnt, heißt Grenzwinkel: derselbe beträgt für den Uebergang aus Wasser in Luft ungefähr $48\frac{1}{2}^{\circ}$, für Glas und Luft aber nur 41°.

Die Erscheinung, die man als totale Reflexion bezeichnet, läßt sich sehr leicht beobachten: man fülle ein Glas mit Wasser und halte es so, daß sich das Niveau etwas höher befindet, als unser Auge (Fig. 193), so erscheint uns die Oberfläche fast so glänzend und silberweiß, wie ein Metallspiegel, und von allen eingetauchten oder hinter dem Glase etwas unter dem Niveau befindlichen Gegenständen erblicken wir sehr vollkommene Spiegelbilder. Blickt ein Taucher bei vollkommen ruhigem Wasser nach oben, so zeigt sich ihm ein eigenthümliches Schauspiel: mittels der Refraction erblickt er alle Gegenstände, die außerhalb des Wassers liegen, innerhalb eines Kreises, dessen Durchmesser ihm unter einem Gesichtswinkel von 97° erscheint; aber die Bilder, die er sieht, sind besonders in der Richtung der Höhe verkürzt und erscheinen dadurch mißgestaltet, und diese Entstellung nimmt nach dem Rande hin immer zu. Jenseits dieser Grenze erblickt er den Grund und alle unter Wasser befindlichen Körper, welche gespiegelt erscheinen und ebenso lebhaft hervortreten, als ob sie direct gesehen würden; die Grenze beider Gesichtsfelder endlich wird durch einen beständigen Regenbogen gebildet, der zwar zart und matt von Farben ist, aber doch sehr deutlich hervortritt.

Durch die totale Reflexion erklärt es sich auch, daß in ein dunkles Zimmer durch eine Oeffnung im Fensterladen kein Licht eindringen kann, wenn sich hinter dieser Oeffnung ein dreiseitiges Glasprisma befindet, bei welchem zwei Flächen rechtwinkelig auf einander sind, während die dritte einen Winkel von 45° mit beiden andern bildet, und wenn das Prisma mit einer der rechtwinkeligen Flächen die Oeffnung deckt (Fig. 194). Die Strahlen, welche rechtwinkelig zur Vorderfläche auftreffen, werden durch dieselbe nicht aus ihren Richtungen abgelenkt, und fallen daher unter einem Winkel von 45° gegen das Einfallsloth auf die schräge Fläche. Da nun für Glas der Grenzwinkel nur 41° beträgt, so werden sie total reflectirt und dringen durch die dritte Fläche des Prisma, bilden aber einen so schmalen Streifen längs der Wand, daß

Digitized by Google

das Zimmer durch sie nicht eigentlich erhellt wird: durch Refraction gelangen keine Strahlen in das Zimmer.

So oft ein Lichtstrahl aus einem Mittel in ein anderes übergeht, das von dem ersten besonders in Bezug auf die Dichtigkeit abweicht, so findet stets eine Strahlenbrechung statt: dieselbe muß daher auch eintreten, wenn die Strahlen, die von der Sonne, dem Monde oder den Sternen kommen, aus dem leeren Weltraume in die dichteren Schichten unserer Atmosphäre übergehen. Wir sehen daher die Sterne niemals in der Richtung der geraden Linien, welche ihren wahren Standpunkt mit unserem Auge verbinden, mit Ausnahme derer, die sich gerade in unserem Zenithe befinden. Die Größe der astronomischen Refraction hängt zunächst von der Höhe ab, in welcher sich der Stern scheinbar über dem Horizonte befindet (Fig. 195); weiter aber ist sie ebenso abhängig von

Fig. 194. Totale Reflexion durch ein gleichschenkliges, rechtwinkliges Glasprisma.

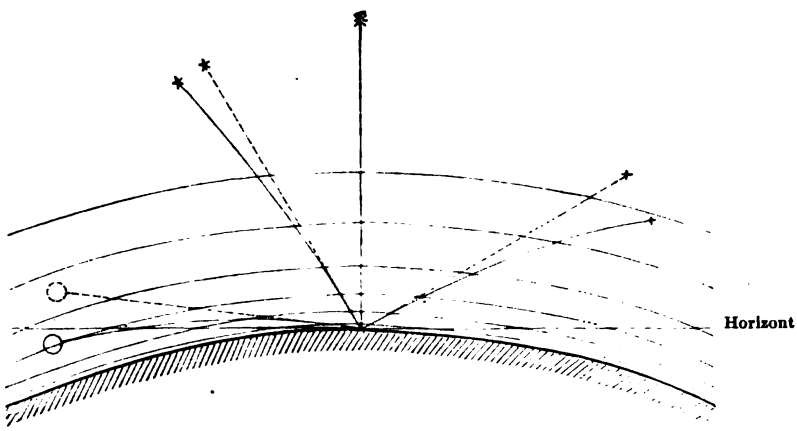


Fig. 195. Astronomische Strahlenbrechung. Einfluß derselben auf den Auf- und Untergang der Sonne.

der Dichtigkeit, Dicke und Vertheilung der Luftschichten in unserer Atmosphäre. Da es nun nicht möglich ist, die Beschaffenheit der Luftschichten, die uns umgeben, zu ergründen, so würde man darauf verzichten müssen,

Digitized by Google

die Größe dieser Strahlenbrechung kennen zu lernen, wenn es nicht möglich wäre, sie aus astronomischen Beobachtungen selbst abzuleiten. Da sich bei der scheinbaren täglichen Umdrehung des Himmels jeder Stern in einem Kreise bewegt, der vom Pole des Himmels überall gleichen Abstand hat, so wird man für jeden Augenblick die Höhe berechnen können, in welcher sich der Stern über dem Horizonte befinden müßte, wenn keine Strahlenbrechung vorhanden wäre. Beobachtet man daher zu irgend welcher Zeit die scheinbare Höhe eines Sternes, so ist der Unterschied zwischen dieser beobachteten und jener berechneten Höhe die Größe, um welche der Strahl von seiner Richtung durch die Atmosphäre abgelenkt wurde. Natürlich ändert sich die Stärke der Refraction auch mit der Beschaffenheit der Luft, also mit dem Barometer- und Thermometerstande, und so ist es erst durch sehr ausgedehnte, sorgfältige Beobachtungen möglich geworden, Tafeln für die Refraction bei bestimmter Höhe, unter Berücksichtigung des Luftdrucks und der Temperatur, zu construiren.

Am Horizonte steigt die Refraction bis auf 34′, d. h. sie beträgt mehr, als der Durchmesser der Sonne und des Mondes. Befinden wir uns daher auf dem Meere, so erscheint uns bereits die ganze Scheibe der Sonne über dem Niveau, während in Wirklichkeit der obere Rand derselben den wahren Horizont noch gar nicht berührt; und da dieselbe Erscheinung auch beim Untergange stattfindet, so werden durch die Refraction, ganz ohne Rücksicht auf die Dämmerung, die Tage beträchtlich verlängert. Aus demselben Grunde kommt es bei totalen Mondfinsternissen vor, daß wir gleichzeitig die Sonne und den verfinsterten Mond über dem Horizonte sehen, während doch jenes Ereigniß nur eintritt, wenn sich die Erde zwischen Sonne und Mond befindet. Erwähnen wir endlich noch, daß auch bei totaler Verfinsterung des Mondes die Sonnenstrahlen durch die Atmosphäre der Erde so zusammengebrochen werden, daß ein Theil derselben den Mond erreicht, so giebt uns dies eine einfache Erklärung dafür, daß bei jenem Vorgange der Mond niemals vollständig unsern Blicken verschwindet, sondern uns immer noch in röthlichem Lichte matt erleuchtet erscheint. Sehen wir den Planeten Venus in großer Nähe bei der Sonne, wenn er uns näher steht, als die Sonne, so würde uns nur die der Sonne zugewendete Seite als schmale Sichel erscheinen können: Beobachtungen, welche kurz vor und

Digitized by Google

nach dem letzten Vorübergange der Venus vor der Sonnenscheibe angestellt wurden, haben aber den Planeten als feinen Ring gezeigt, ein Beweis, daß auch er von einer Atmosphäre umgeben ist, welche die Strahlen bricht.

§ 3. Brechung der Lichtstrahlen in Platten mit parallelen Flächen und in Prismen.

Hält man zwischen einen leuchtenden Punkt und das Auge irgend einen durchsichtigen Körper, z. B. ein Stück Glas, dessen Grenzflächen parallel sind, so, daß die Verbindungslinie des Punktes und des Auges auf diesen Flächen senkrecht steht, so wird das Licht in derselben Richtung in unser Auge dringen, als ob der durchsichtige Körper gar nicht vorhanden wäre, da senkrechte Strahlen von ihrem Wege nicht abgelenkt werden. Blickt man dagegen schräg gegen die Fläche, so erleiden die

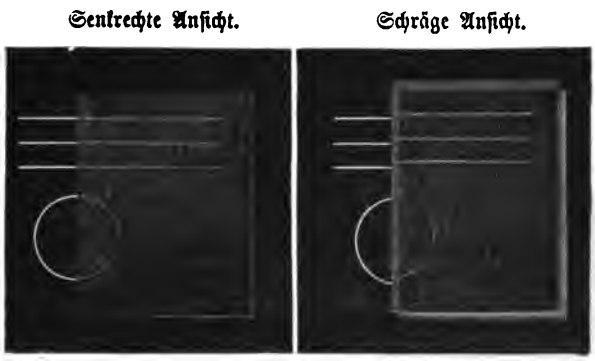


Fig. 196. Ablenkung eines Lichtstrahles durch Platten mit parallelen Flächen.

Strahlen eine Ablenkung, welche man durch einen einfachen Versuch zur Anschauung bringen kann. Zeichnet man auf ein Papier verschiedene Linien und legt man auf dieselben ein Stück Glas, welches sie zum Theil verdeckt (Fig. 196), so wird man sehen, wenn man senkrecht darauf blickt, daß die durch das Glas betrachteten Linien die Fortsetzungen der direct gesehenen bilden; sieht man dagegen in schräger Richtung nach der Platte, so zeigen die Linien an der Grenze des Glases Unterbrechungen: sie erscheinen seitwärts gerückt, und die Abweichung wird um so größer, je weiter sich der Strahl von der senkrechten Richtung entfernt. Diese Abweichung, welche offenbar eine Folge der Refraction ist, nimmt, außer

Digitized by Google

mit der Größe des Winkels, auch noch mit der Dicke der Platte zu. Durch diese Erscheinung müßten eigentlich die Bilder, die mit Glas bedeckt sind, für unser Auge, wenn wir mitten davor stehen, nach dem Rande hin verzerrt erscheinen: diese Störung der Regelmäßigkeit ist aber so gering, daß sie nur mit der größten Aufmerksamkeit wahrzunehmen ist.

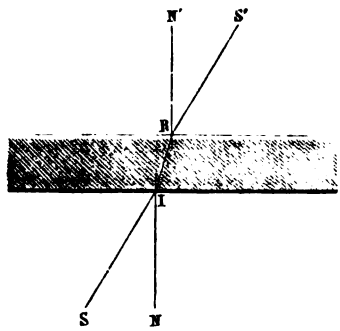


Fig. 197. Weg eines Lichtstrahles durch eine Platte mit parallelen Flächen.

Fig. 198. Weg eines Strahlenbündels.

Der Ausdruck Abweichung ist für diese Erscheinung eigentlich nicht ganz correct: es würde richtiger sein, wenn wir sagten, daß der Strahl zur Seite verschoben ist; denn, wie aus Fig. 197 deutlich zu ersehen ist, wird der Strahl, nachdem er die Platte durchwandert hat, wieder in eine Richtung gelenkt, welche der ursprünglichen Richtung parallel ist, und nur eine kleine Verschiebung hat stattgefunden. Die Normalen in dem Punkte I, wo der Strahl in die Platte tritt, und in R, wo er sie wieder verläßt, sind nämlich wegen des Parallelismus der Flächen selbst parallel, und also bildet IR mit ihnen gleiche Winkel: da nun weiter das Brechungsverhältniß in R dasselbe ist, wie in I, so folgt, daß auch Winkel SIN gleich dem Winkel S'RN' ist, woraus sich weiter der Parallelismus von SI und RS' sofort ergiebt. Gehen von einem Punkte S hinter einer Platte divergente Lichtstrahlen aus (Fig. 198), so werden dieselben auch noch

Fig. 199. Mehrfache Bilder in Platten mit parallelen Flächen.

Digitized by Google

jenseits der Platte weiter divergiren: es scheint aber, als kämen sie von einem Punkte S', welcher gegen den Punkt S gehoben erscheint.

Hält man eine Kerze vor ein Spiegelglas, dessen Rückseite belegt ist, und blickt man in etwas schräger Richtung in den Spiegel, so sieht man zunächst das starkleuchtende Bild, welches durch die Spiegelung am Belege entsteht, vor demselben aber noch ein schwächeres Bild durch die Reflexion der Strahlen an der Vorderfläche des Glases; endlich erblickt man hinter diesen Bildern bei einiger Aufmerksamkeit noch eine ganze Reihe von Bildern, welche aber immer schwächer werden (Fig. 199). Diese letzteren Bilder entstehen dadurch,

Fig. 200. Weg der Strahlen in dem Falle, daß mehrfache Bilder entstehen.

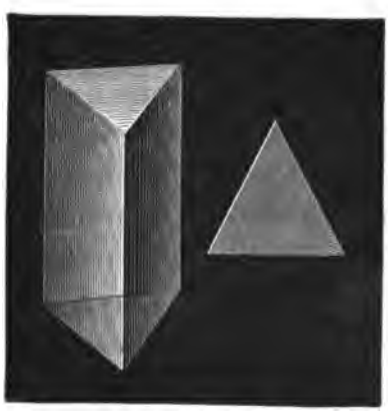


Fig. 201. Geometrische Gestalt des Prisma.

Fig. 202. Prisma auf einem Stativ.

daß die Strahlen, wenn sie in das Innere der Glasmasse hineingebrochen sind, zwischen den Flächen der Platte erst mehrfache Reflexion erleiden, ehe sie wieder in die Luft hinaus treten, wie aus Fig. 200 ersichtlich ist.

Digitized by Google

Wenden wir uns jetzt zu dem Falle, daß das Licht einen durchsichtigen Körper durchwandert, dessen Grenzflächen nicht parallel sind. Am einfachsten ist es, wenn wir die Vorgänge an Glasprismen studiren, deren Gestalt und Querschnitt in Fig. 201 dargestellt ist, und die auf einem Stativ so befestigt sind, daß man sie leicht neigen und um ihre Axe drehen kann (Fig. 202). Bei dem in Fig. 201 abgebildeten Prisma ist der Querschnitt ein gleichseitiges Dreieck, die Flächen bilden daher mit einander Winkel von 60°; man kann aber ebensogut andere Prismen untersuchen: den Winkel, welchen die beiden Flächen bilden, durch die der beobachtete Strahl ein- und austritt, bezeichnet man als den brechenden Winkel, die Linie dagegen, in welcher jene beiden Flächen zusammenstoßen, als die brechende Kante des Prisma.

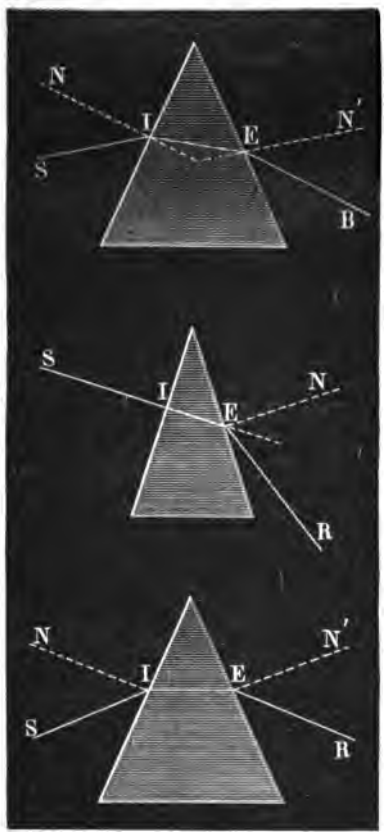


Fig. 203. Ablenkung der Lichtstrahlen in Prismen.

Der Weg eines Lichtstrahles, der durch eine Fläche des Prisma eindringt, quer durch dasselbe wandert, und es durch eine zweite Fläche verläßt, läßt sich aus Fig. 203 leicht verfolgen. Sei SI der einfallende Strahl, so wird derselbe zunächst in I dem Einfallslothe zu gebrochen, durchwandert dann das Prisma in der Richtung IE, und wird endlich bei seinem Austritte in E wieder von dem in E errichteten Lothe abgelenkt. Die Beobachtung bestätigt diesen Vorgang vollständig, denn stellt man ein Prisma so auf, daß seine brechende Kante horizontal liegt und sich oben befindet, so erscheinen alle Gegenstände, welche man durch dasselbe erblickt, gehoben; liegt die brechende Kante dagegen nach unten, so erscheinen sie gesenkt (Fig. 204).

Je größer der brechende Winkel ist, desto stärker ist bei gleichem Einfallswinkel die Abweichung der Strahlen: nähert sich bei einem und

Digitized by Google

demſelben Prisma der einfallende Strahl dem Einfallslothe, ſo wächſt der Winkel, unter welchem der Strahl die zweite Fläche des Prisma verläßt, und es wird immer eine Richtung geben, bei welcher der Grenzwinkel für die totale Reflexion erreicht iſt. In dieſem Falle kann der Strahl nicht mehr aus dem Prisma austreten. Bei welchem Einfallswinkel dies eintritt, das hängt vom Brechungsexponenten des Stoffes, aus dem das Prisma beſteht, und von der Größe des brechenden Winkels ab. Bei Glasprismen mit dem brechenden Winkel von 45° können alle

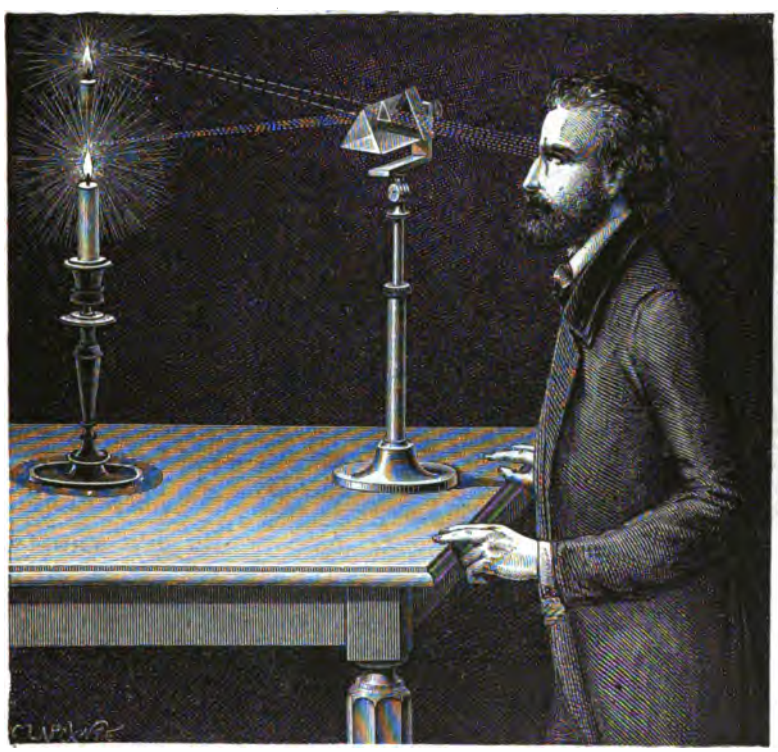


Fig. 204. Bilder der Gegenſtände durch ein Prisma.

die Strahlen nicht mehr austreten, deren Richtung von der Normalen nach der Seite der brechenden Kante hin abweicht; iſt dagegen der brechende Winkel des Glaſes 90°, ſo tritt überhaupt kein Strahl auf der anderen Seite des Prisma wieder aus.

Daß beim Durchgange des Lichts durch ein Prisma daſſelbe in ſeine Farben aufgelöſt wird, davon ſprechen wir ſpäter: zuvor aber wenden wir uns zu dem Wege des Lichts durch Körper, welche von gekrümmten Flächen begrenzt werden.

Digitized by Google

§ 4. Brechung des Lichtes in Linsen.

Wenn man ein Stück Glas oder irgend einen anderen durchsichtigen Körper so schleift, daß beide Seiten gewölbt sind und ihre Flächen Theile von Kugeloberflächen bilden, so entsteht dadurch ein optisches Instrument, das man als Linse (Fig. 205) bezeichnet, ein Name, der von der Aehnlichkeit der Gestalt mit der bekannten Hülsenfrucht herrührt. Wie wir bald sehen werden, giebt es verschiedene Arten von Linsen: die soeben beschriebene, welche auch Loupe heißt, ist die verbreitetste und dient den Naturforschern, Kupferstechern, Uhrmachern und anderen Leuten dazu, die Gegenstände zu vergrößern, wenn sie dieselben in ihren Einzelheiten genauer betrachten wollen.

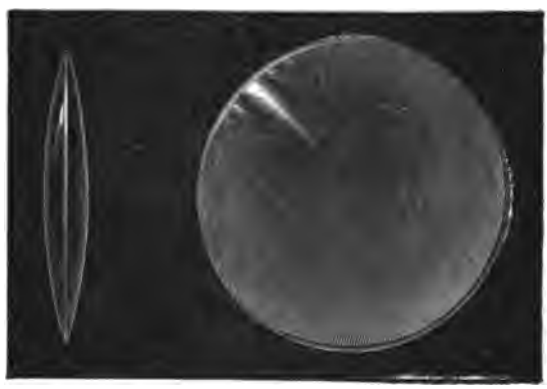


Fig. 205. Loupe oder Linse mit convexen Flächen.

Man kann wohl mit ziemlicher Sicherheit annehmen, daß die Linsen und ihre vergrößernde Kraft schon seit sehr alten Zeiten bekannt waren: denn sowohl in dem Schutte von Ninive als auch unter den Trümmern von Herculanum und Pompeji hat man Körper gefunden die man kaum für etwas anderes, als für Loupen ansehen kann. Die Brillen sind in Europa bereits seit Anfang des 4. Jahrhunderts im Gebrauche. Allein es ist kaum 3 Jahrhunderte her, seit man die Gesetze der Strahlenbrechung so genau kennen gelernt hat, daß man die Gläser so schleifen und in solcher Weise mit einander combiniren konnte, daß man dadurch jeden beliebigen Effect in aller Strenge zu erzielen im Stande war.

Der Name Linse ist von den Physikern weiter übertragen worden auf alle durchsichtigen Körper, welche wenigstens auf der einen Seite von einer gekrümmten Fläche, einer Kugel- oder Cylinderfläche, begrenzt werden, auch dann noch, wenn diese Fläche vertieft oder concav, statt wie bei der Loupe convex oder erhaben ist. In den meisten Fällen

Digitized by Google

sind beide Flächen Theile von Kugeloberflächen, oder die eine ist kugelförmig, die andere wird von einer Ebene gebildet: wir wollen in diesem Buche nur auf diese Fälle Rücksicht nehmen. Alle Linsen zerfallen in zwei Hauptabtheilungen nach dem Wege, welchen die Lichtstrahlen einschlagen, nachdem sie dieselben durchwandert haben. Bei der einen Gruppe, welche man Sammellinsen nennt, werden die Strahlen eines Bündels nach ihrem Durchgange stärker zusammengebrochen: bei der anderen Gruppe, den Zerstreuungslinsen, werden sie in größere Divergenz versetzt. Die Sammellinsen sind in ihrer Mitte am dicksten und laufen gewöhnlich am Rande in eine Schneide aus, wogegen die Zerstreuungslinsen in der Mitte schwächer sind, als am Rande.

Die wichtigste Form unter den Sammellinsen ist die Loupe oder

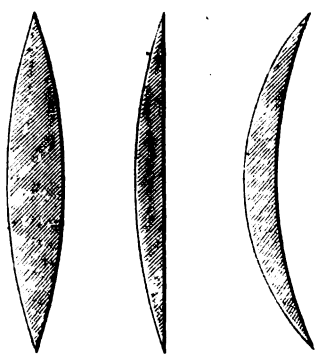


Fig. 206. Sammellinsen. — Biconvexe, planconvexe und concav-convexe Linse.

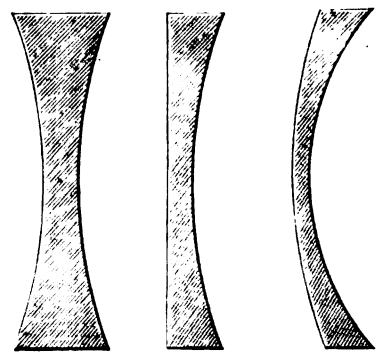


Fig. 207. Zerstreuungslinsen. — Biconcave, planconcave und convex-concave Linse.

biconvexe Linse, deren beide Flächen, und zwar gewöhnlich in gleicher Krümmung, gewölbt sind; hierauf folgt die planconvexe Linse, bei welcher nur eine Seite gewölbt, die andere eben ist; endlich gehört hierher die concav-convexe Linse, bei welcher eine Seite erhaben, die andere vertieft ist, jedoch so, daß die erhabene Seite eine stärkere Krümmung besitzt, als die vertiefte. In Fig. 206 sind die Querschnitte dieser drei Formen dargestellt.

In gleicher Weise stellt Fig. 207 die Querschnitte der Zerstreuungslinsen dar, nämlich der biconcaven, bei welcher beide Seiten vertieft sind, der planconcaven, bei welcher eine Seite vertieft, die andere eben ist, und der convex-concaven, bei welcher die eine Seite vertieft, die andere erhaben ist, jedoch so, daß die Krümmung der vertieften Seite stärker ist.

Digitized by Google

Die zuletzt erwähnte Linse, ebenso wie die concav-convexe, nennt man auch einen Meniscus. Verbindet man die Mittelpunkte der Kugeln, von denen die Grenzflächen der Linse Theile sind, so heißt diese Verbindungslinie die Axe der Linse. Ist die eine Grenzfläche eben, so findet man die Axe, wenn man vom Mittelpunkte der Kugel, von welcher die andere Grenzfläche ein Theil der Oberfläche ist, auf jene Ebene eine Senkrechte fällt. Bei den Sammellinsen geht die Axe durch den dicksten, bei den Zerstreuungslinsen durch den dünnsten Theil der Linse.

Ehe wir noch irgend einen Versuch anstellen, können wir schon von vornherein sagen, daß ein Strahl, welcher die Linse in der Richtung der Axe trifft, nicht aus seiner Richtung gelenkt werden kann, weil er beide Flächen der Linse unter rechten Winkeln schneidet und also weder beim Eintritte noch beim Austritte eine Brechung erleidet. Außer den in der Axe einfallenden Strahlen giebt es noch andere, welche, nachdem sie die Linse durchwandert haben, sich in ihrer ursprünglichen Richtung weiter bewegen: es sind dies diejenigen, welche die beiden Flächen in Punkten treffen, bei denen die Richtungen beider Flächen als parallel anzusehen sind. Von solchen Strahlen giebt Fig. 208 sowohl für eine Sammel-, als auch für eine Zerstreuungslinse, ein Beispiel. In beiden Fällen trifft der Strahl NI die Oberfläche in einem Punkte, in welchem IB Tangente ist, wird dann in die Richtung II' gelenkt und verläßt die Linse in der Richtung I'N', welche der Richtung NI parallel ist, sobald die Tangente I'A der Tangente IB parallel ist. Da die Dicke der Linse gewöhnlich nicht bedeutend ist, so ist auch die Verschiebung dieser Strahlen so gering, daß man sie vollständig vernachlässigen darf: man kann also sagen, daß alle diese Strahlen, welche man Hauptstrahlen nennt, ungebrochen durch die Linse gehen. Es läßt sich geometrisch beweisen, daß sich alle Hauptstrahlen in einem Punkte der Axe, welchen man optischen Mittelpunkt nennt, schneiden müssen: dieser Punkt liegt in der Mitte zwischen beiden Flächen, wenn die Krümmung auf beiden Seiten dieselbe ist; bei planconvexen und planconcaven Linsen

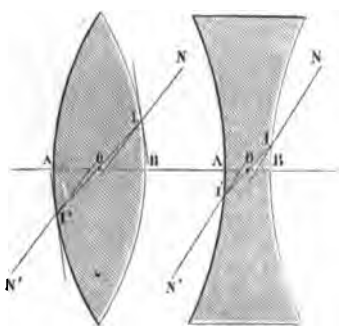


Fig. 208. Hauptstrahlen. — Optischer Mittelpunkt.

Digitized by Google

fällt er in den Punkt, wo die Axe die gekrümmte Seite durchschneidet, endlich bei einem Meniscus liegt er außerhalb desselben.

Nachdem wir den Weg einiger Strahlen in irgendwelchen Linsen kennen gelernt haben, wollen wir uns nunmehr ausschließlich zu den biconvexen Linsen wenden und noch die Richtung anderer Strahlen verfolgen. Stellen wir eine solche Linse so auf, daß ihre Axe der Richtung der Sonnenstrahlen parallel ist, und bringen wir hinter die Linse einen Schirm, so sehen wir auf demselben einen erleuchteten runden Fleck, dessen Größe und Schärfe von dem Abstande des Schirmes von der Linse abhängt. Nach einigem Hin- und Herbewegen des Schirmes wird man endlich für denselben eine Stellung finden, bei welcher der erleuchtete Fleck den kleinsten Durchmesser besitzt, während seine Fläche den stärksten Glanz ausstrahlt und am schärfsten begrenzt ist. Käme das Licht von einem einzigen Punkte, statt von der Sonne, so würde es sich hinter der Linse auch in einem Punkte, dem Brennpunkte F, concentriren (Fig. 209): der Abstand dieses Punktes von der Linse, welcher Brennweite heißt, hängt sowohl von dem Stoffe, aus dem die Linse besteht, als auch von der Krümmung ihrer Flächen ab. Je schärfer die Flächen gekrümmt sind, desto näher an der Linse liegt der Brennpunkt: man sagt dann, daß die Linse von kurzer Brennweite sei. Bringt man die Linse in eine Oeffnung des Ladens in einem dunkeln Zimmer, so kann man durch den Staub, der in der Luft schwebt, deutlich sehen, wie sich das Strahlenbündel nach dem Brennpunkte hin zusammenzieht, hinter diesem Punkte aber wieder ausdehnt.

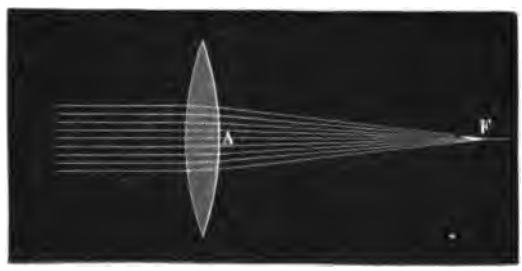


Fig. 209. Vereinigung der Parallelstrahlen im Brennpunkte.

Will man sich darüber Rechenschaft geben, warum die biconvexen Linsen die Strahlen zu größerer Convergenz bringen, so kann man zum Vergleiche die Brechung des Lichtes in Prismen heranziehen, welche, wie wir sehen, immer so erfolgt, daß der Strahl sich von der brechenden Kante ab- und der Richtung der Basis zuwendet. Denkt man sich eine

Digitized by Google

Linse durch Flächen, die der Axe parallel gehen, in einzelne Theile zerlegt, so kann man jeden dieser Theile annähernd als ein Prisma ansehen, das die Strahlen der gemeinsamen Basis, also der Axe zu bricht (Fig. 210). Die brechenden Winkel dieser Prismen werden immer größer, je weiter die Prismen selbst von der Axe entfernt sind: daher werden auch die Lichtstrahlen in den entfernteren Theilen der Linse stärker gebrochen, als in der Nähe der Axe. Treffen Strahlen parallel der Axe auf die Linse, so ist aus Fig. 210 zu erkennen, daß es wohl denkbar ist, daß sie sich in einem Punkte der Axe, dem Brennpunkte schneiden.

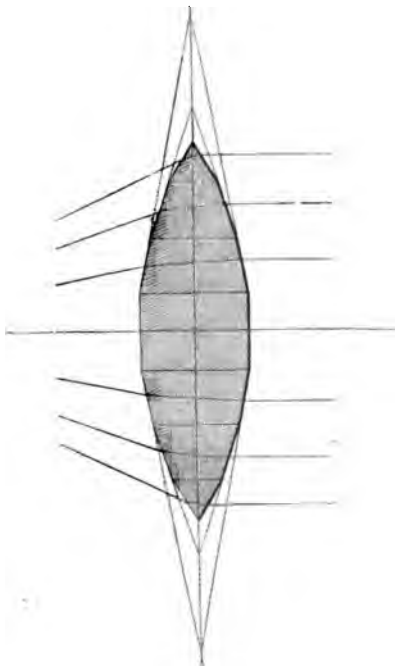


Fig. 210. Zerlegung einer Linse in Prismen.

Kommt das Licht von einem sehr entfernten Punkte der Axe, so vereinigen sich die Strahlen, da sie als Parallelstrahlen anzusehen sind, jenseits der Linse im Brennpunkte F. Rückt nun der leuchtende Punkt näher an die Linse heran, etwa bis in den Punkt S (Fig. 211), so sind die Strahlen, welche von ihm auf die Linse treffen, nicht mehr parallel, sondern divergent; sie werden daher

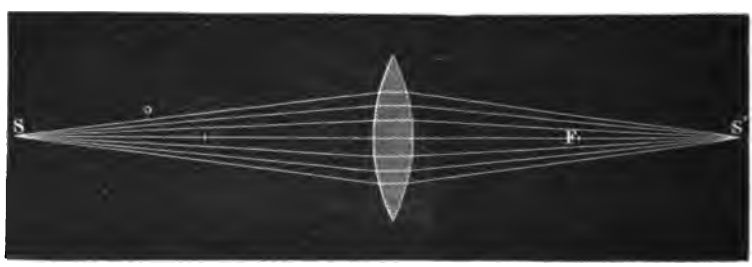


Fig. 211. Weg der Strahlen, welche von einem Punkte der Axe ausgehen. Conjugirte Punkte.

auch nicht mehr nach dem Durchgang durch die Linse so stark convergiren wie zuvor, schneiden sich also nicht in F, sondern in einem entfernteren Punkte der Axe S'. Je mehr der leuchtende Punkt S heranrückt, desto

Digitized by Google

mehr muß sich sein Bild S′ entfernen; beträgt die Entfernung von S noch doppelt so viel als die Brennweite, so ist die Entfernung des Bildes S′ derselben genau gleich, Gegenstand und Bild sind zu beiden Seiten der Linse gleich weit von derselben entfernt. Rückt der Gegenstand noch näher, so rückt sein Bild immer weiter hinaus und gelangt bis in unendliche Entfernung, wenn der leuchtende Punkt bis in die Brennweite herangerückt ist: gehen also Strahlen von einem Brennpunkte aus nach der Linse, so werden dieselben als Parallelstrahlen aus ihr austreten.

Bis zu dieser Grenze heran schnitten sich die Strahlen wirklich in einem Punkte, in welchem ein *reelles* Bild des leuchtenden Punktes entsteht, das man ebenso auf einem Schirme auffangen kann, wie wir es früher bei den Hohlspiegeln gesehen haben. Weiter ist leicht einzusehen, daß Licht, welches vom Punkte S′ ausgeht, sich im Punkte S vereinigen muß, das Verhältniß der Punkte S und S′, welche man *conjugirte* Punkte nennt, ist daher ein gegenseitiges. Für den Brennpunkt liegt der conjugirte Punkt in unendlicher Entfernung.

Rückt nun der leuchtende Punkt S noch näher an die Linse heran, sodaß seine Entfernung kleiner wird, als die Brennweite, so ist nunmehr die Divergenz der Strahlen so groß, daß sie durch die Brechung in der Linse nicht mehr in convergente Strahlen verwandelt werden können: sie divergiren also noch, nachdem sie die Linse verlassen haben, aber nicht mehr so stark, als zuvor. In diesem Falle giebt es daher kein reelles Bild des Lichtpunktes, das man auf einem Schirme auffangen könnte; bringt man aber das Auge in die Richtung der austretenden Strahlen, so dringen sie in dasselbe ein, als kämen sie von einem hinter der Linse in größerer Entfernung liegenden Punkte S′, welcher das *virtuelle* Bild von S heißt (Fig. 212). Bei größerer Annäherung des leuchtenden Punktes nähert sich auch das virtuelle Bild und fällt mit dem Punkte zusammen, wenn derselbe dicht an die Linse herangerückt ist.

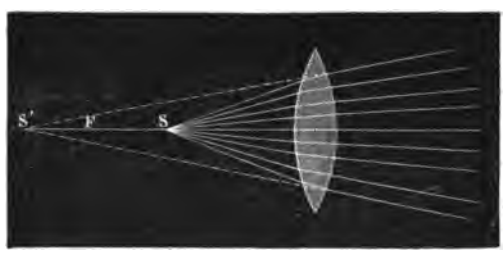


Fig. 212. Weg der Strahlen, die von einem Punkte innerhalb der Brennweite ausgehen. Virtuelles Bild.

Zur Erklärung der bei den Beobachtungen gefundenen Resultate

Digitized by Google

wollen wir an Stelle der leuchtenden Punkte Gegenstände von einiger Ausdehnung anwenden; so können wir für jeden Punkt derselben, der nicht in die Axe fällt, das Bild leicht dadurch finden, daß wir von ihm aus einen Hauptstrahl und einen Parallelstrahl ziehen: ersterer geht ungebrochen durch die Linse, letzterer wird durch den Brennpunkt gebrochen; schneiden sich beide, so fällt in ihren Durchschnittspunkt das reelle Bild des Punktes, divergiren sie, so liegt in dem Punkte, von welchem aus sie auszugehen scheinen, das virtuelle Bild. Führt man z. B. diese Construction für die Punkte des Gegenstandes AB (Fig. 213) aus, dessen Entfernung von der Linse größer ist, als das Doppelte der Brennweite, so findet man für A das Bild a, und für B das Bild b, es

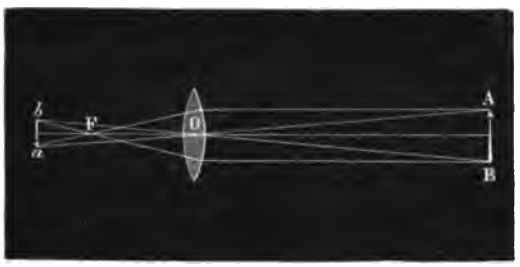


Fig. 213. Reelles, verkehrtes und verkleinertes Bild eines Gegenstandes.

Fig. 214. Reelles Bild einer Kerze.

ergiebt sich also für AB ein reelles, verkehrtes und verkleinertes Bild ab. Rückt man nun den Gegenstand AB näher, so behalten die Parallelstrahlen ihre Lage, die Hauptstrahlen werden aber steiler, sodaß sie die Fortsetzungen der Parallelstrahlen erst in größerer Entfernung schneiden: das Bild entfernt sich von der Linse und wächst. Sieht man nun, daß

Digitized by Google

bei einer bestimmten Lage das Bild genau die Größe des Gegenstandes hat, und mißt man die Entfernung beider von der Linse, so findet man diese Abstände von gleicher Größe. Rückt der Gegenstand AB noch näher, jedoch noch nicht bis zum Brennpunkte, so wird das Bild reell und verkehrt bleiben, aber vergrößert erscheinen wie aus Fig. 215 leicht zu ersehen ist. Mit Hülfe einer Kerzenflamme und eines Schirmes, den man so lange rückt, bis das Bild auf ihm deutlich wird, lassen sich diese Versuche leicht ausführen (Fig. 214).

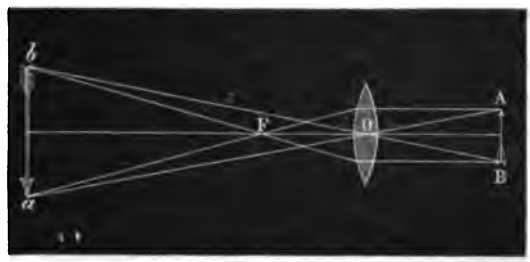


Fig. 215. Reelles, verkehrtes und vergrößertes Bild.

Ist die Flamme ziemlich nahe, also das Bild ziemlich weit entfernt, so bemerkt man, daß das Bild nicht so leuchtend und scharf begrenzt ist, als wenn seine Entfernung kleiner ist; der Grund hierfür ist sehr einfach: die Linse kann zu dem Lichte, das von der Kerze ausgeht, kein neues hinzufügen; ist daher das Bild nahe und klein, so concentrirt sich das ganze Kerzenlicht auf einer kleinen Fläche, bei größerer Entfernung wird es mehr zerstreut; auch Unregelmäßigkeiten in der Strahlenbrechung müssen bei den größeren Bildern sich bemerklicher machen, wodurch diese Bilder an Schärfe einbüßen.

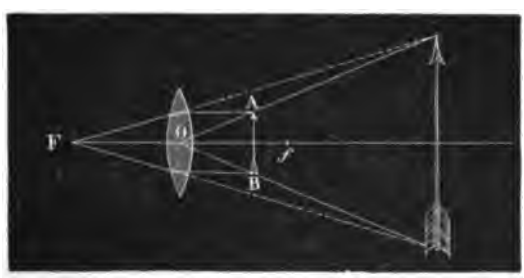


Fig. 216. Virtuelles, aufrechtes und vergrößertes Bild.

Ist die Kerze bis in den Brennpunkt gelangt, so treten ihre Strahlen alle parallel aus der Linse und vereinigen sich nirgends zu einem Bilde: sie werden weit hinausgeworfen, das Bild der Kerze ist aber verschwunden. Wir rücken die Kerze noch näher heran, so wird der Schirm, wo wir ihn auch aufstellen mögen, immer nur diffuses Licht geben: setzen wir dagegen unser Auge an Stelle des Schirmes, so sehen wir hinter der Linse ein vergrößertes, aufrechtes Bild der Flamme. Die Entstehung dieses Bildes läßt sich aus Fig. 216 leicht einsehen: zieht mau vom Punkte A aus

Digitized by Google

einen Parallelstrahl, so wird derselbe durch den Brennpunkt F gebrochen, der Hauptstrahl AO aber geht ungebrochen weiter. Da nun diese beiden Strahlen divergiren, so scheinen sie einem vor der Linse befindlichen Auge von einem Punkte hinter derselben zu kommen, den man findet, wenn man die Strahlen nach rückwärts verlängert. Nähert man den Gegenstand der Linse, so behalten die Parallelstrahlen ihre Lage, die Hauptstrahlen aber werden immer steiler, wodurch das Bild allmählich näher heranrückt und kleiner wird, bis es mit dem Gegenstande zusammenfällt, wenn derselbe die Linse berührt. Wird eine Sammellinse in dieser Weise angewendet, so nennt man sie eine Loupe.

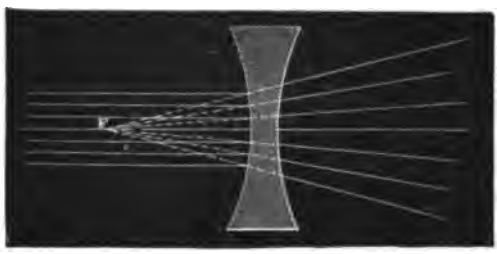


Fig. 217. Virtueller Brennpunkt einer Zerstreuungslinse.

Für Zerstreuungslinsen giebt es keine reellen Brennpunkte: treffen parallele Strahlen in der Richtung der Axe auf eine biconcave Linse (Fig. 217), so treten sie aus derselben divergent aus, als kämen sie von einem Punkte F hinter der Linse, welchen man ihren virtuellen Brennpunkt nennt. In gleicher Weise lassen sich durch die Zerstreuungslinsen für irgend welche Gegenstände niemals reelle Bilder herstellen, da die Strahlen, die von einem Punkte ausgehen, niemals zur Convergenz gebracht werden, sondern nach ihrem Durchgange durch die Linse immer stärker divergiren, als zuvor. Ueber Lage und Größe der Bilder bei der biconcaven Linse giebt Fig. 218 Auskunft. Zieht man vom Punkte A den Hauptstrahl AO, so geht derselbe ungebrochen durch die Linse, der Parallelstrahl dagegen wird so gebrochen, als käme er vom virtuellen Brennpunkte F: beide Strahlen divergiren daher nach ihrem Durchgange durch die Linse, als wenn sie vom Punkte a ausgingen, es ist also a das virtuelle Bild von A. In dieser Weise findet man, daß

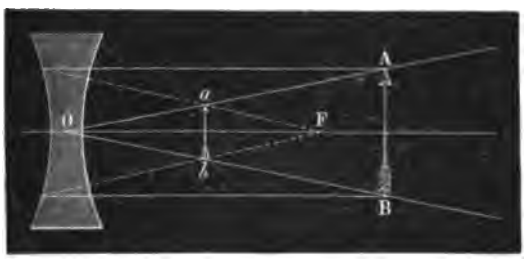


Fig 218. Virtuelles, aufrechtes und verkleinertes Bild in einer Zerstreuungslinse.

Digitized by Google

von einem Gegenstande AB hinter der Linse ein virtuelles, aufrechtes, verkleinertes Bild ab entsteht, das näher an der Linse liegt, als der Gegenstand selbst.

Die Linsen verschiedener Art werden vielfach mit einander vereinigt und aus ihnen werden Instrumente der mannigfachsten Art gebildet, welche entfernte Gegenstände unseren Blicken näher bringen sollen, wie die Fernrohre, oder uns die Welt des Kleinen erschließen, wie die Mikroskope. Da die Beschreibung dieser Instrumente in ein Werk gehört,

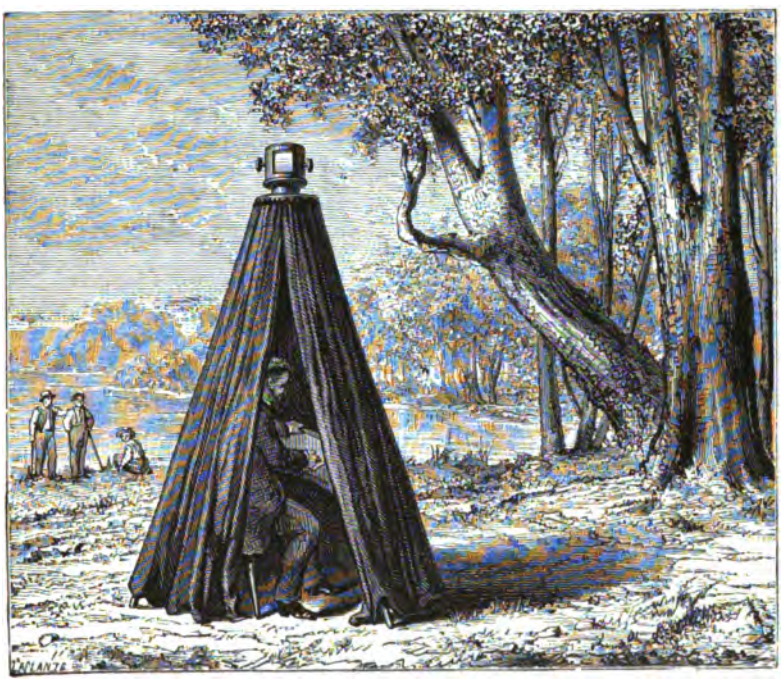


Fig. 219. Camera obscura.

das sich mit den Anwendungen der Physik beschäftigt, wir aber nur die physikalischen Erscheinungen in Betracht ziehen wollen, so werden wir uns auch hier auf die Besprechung derjenigen Apparate beschränken, die die Refraction in nur einfacher Weise zur Anwendung bringen: wir sprechen daher nur von der Camera obscura in ihren verschiedenen Formen, der Laterna magica und den Sonnen- und Gasmikroskopen.

Wir haben schon früher erwähnt, daß man auf einem Schirme das verkehrte Bild einer von der Sonne beschienenen Landschaft erhalten kann, wenn man denselben in einem dunklen Zimmer einer Oeffnung

Digitized by Google

im Fensterladen gegenüber aufstellt. Da dieses Bild aber bei kleinen Oeffnungen sehr lichtschwach, bei großen dagegen unklar und verwaschen ist, so kam im siebzehnten Jahrhundert der Physiker Porta zunächst auf den Gedanken, die Lichtstrahlen auf einem sphärischen Hohlspiegel aufzufangen und sie dann erst auf dem Schirme zu concentriren; bald darauf aber ersetzte er diesen Spiegel durch eine Sammellinse, welche er in der Oeffnung des Ladens selbst anbrachte, und erhielt nun überraschend gute Resultate. Auf diese Weise war die Vorrichtung erfunden, die man mit dem Namen einer Camera obscura bezeichnet, und der man je nach dem Zwecke, dem sie dienen soll, verschiedene Formen giebt. Will man z. B. eine Landschaft nach der Natur aufzeichnen, so befestigt man die Sammellinse auf der Spitze eines geschlossenen Zeltes, in welchem sich ein Tisch befindet, auf dem das Zeichenpapier befestigt wird (Fig. 219): über der Linse aber bringt man einen kleinen, unter 45° geneigten Planspiegel an, der die horizontal anlangenden Lichtstrahlen senkrecht auf die Linse wirft, sodaß auf dem Tische ein deutliches Bild der Umgebung entsteht. An Stelle der Linse und des Spiegels ist es vortheilhaft eine eigenthümlich gestaltete Linse anzuwenden, die der Optiker Chevalier erfunden hat, und die in Fig. 220 abgebildet ist. Dieselbe besteht aus einem kurzen Glasprisma, an dessen vorderer Fläche ein Theil einer convexen Kugelfläche angeschliffen ist: ebenso ist die untere Fläche kugelförmig, aber concav, und ihre Krümmung ist geringer; die Rückwand endlich wird von einer unter einem Winkel von 45° geneigten Ebene gebildet. Treffen nun horizontale Lichtstrahlen auf die Vorderfläche, so werden sie durch dieselbe convergent gemacht, erleiden hierauf an der Rückwand eine totale Reflexion, und treten endlich durch die untere Fläche, die ihre Convergenz etwas vermindert, so aus, daß sie sich auf der Fläche des Tisches zu reellen Bildern vereinigen.

Fig. 220. Linse nach Chevalier.

Eine andere Form giebt man der Camera obscura, wenn es sich darum handelt, von einer Statue, einem Gemälde oder irgend einem anderen Gegenstande ein vergrößertes Bild herzustellen: man bringt in der Wand einer dunkeln Kammer selbst eine Sammellinse von großer

Digitized by Google

Oeffnung und großer Brennweite an, der man den Gegenstand gegenüberstellt; letzteren aber beleuchtet man mittels eines Spiegels scharf durch das Licht der Sonne oder einer starken künstlichen Lichtquelle, weil sich

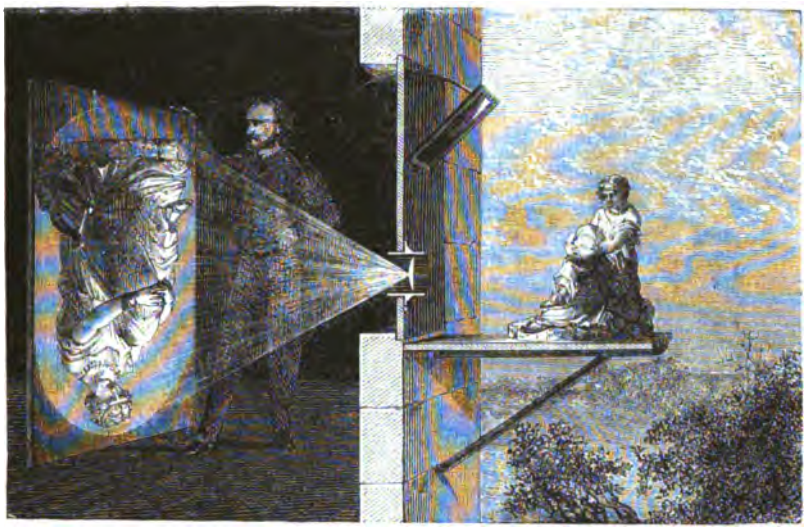


Fig. 221. Megaskop.

bei der Vergrößerung das Licht sehr zerstreut. Eine solche Vorrichtung nennt man ein Megaskop (Fig. 221).

Genau dieselbe Einrichtung hat auch die Laterna magica, bei welcher man als Gegenstände Bilder wählt, welche mit durchsichtigen Oelfarben auf Glas gemalt sind: diese Bilder werden verkehrt hinter ein System von zwei Linsen geschoben und durch eine Lampe beleuchtet, hinter welcher sich ein Hohlspiegel befindet, der das Licht der Lampe auf den Bildern concentrirt (Fig. 222). Wendet man hierbei fein gemalte Bilder und ein sehr intensives Licht, z. B. elektrisches Kohlenlicht oder Drummond'sches Kalklicht an, so kann man sehr stark vergrößerte, gute Bilder auf der gegenüberliegenden Wand hervorrufen. Dadurch, daß man die Linsen etwas verschiebt und zugleich das Licht durch eine Blende immer mehr abschwächt, kann man bewirken, daß das Bild immer

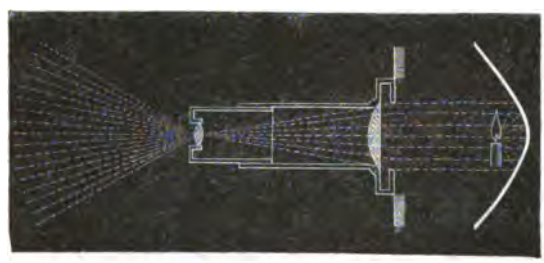


Fig. 222. Laterna magica.

Digitized by Google

undeutlicher und lichtschwächer wird und endlich ganz verschwindet: wendet man nun zwei gleichartig construirte Apparate an, so kann man leicht ein Bild, das der eine Apparat giebt, allmählich in das Bild des anderen Apparates überführen, kann in dieser Weise z. B. eine Sommerlandschaft in eine Winterlandschaft, Tag in Mondennacht, ruhige See in stürmisches Meer verwandeln, u. s. w., kurz, man erhält die allbekannten Nebelbilder.

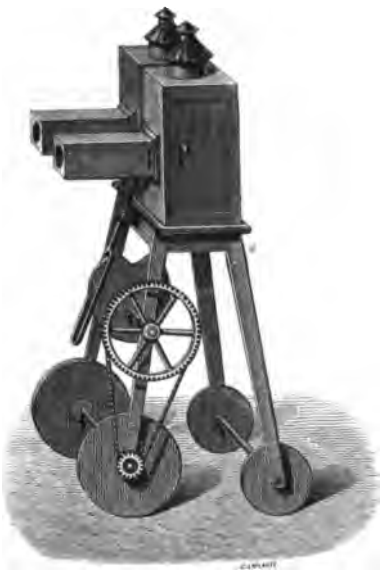


Fig. 223. Phantaskop.

Nähert man die Laterna magica der Fläche, auf welcher die Bilder aufgefangen werden sollen, so muß man zugleich, um scharfe Bilder zu erhalten, die Linse vom Objecte entfernen, wobei die Bilder kleiner werden; im entgegengesetzten Falle ist die Linse zu nähern und die Bilder wachsen. Stellt man daher die Laterna magica auf Räder, so kann man mit den letzteren ein Hebelwerk in Verbindung setzen, welches beim Heranrollen des Apparates gegen einen Schirm zugleich die Linse mehr vom Glasbilde entfernt, und umgekehrt. Durch einen derartigen Apparat, ein sogenanntes Phantaskop (Fig. 223), welcher hinter einem Vorhange von dünnem Zeuge aufgestellt war und sich geräuschlos bewegen ließ, wußte Robertson gegen Ende des vorigen Jahrhunderts, also in einer Zeit, wo das Hereinragen der Geisterwelt in die Welt der Sinne ohnedies eine große Rolle spielte, Geister zu citiren, und brachte dadurch noch größere Verwirrung in ohnedies schon unklare Köpfe.

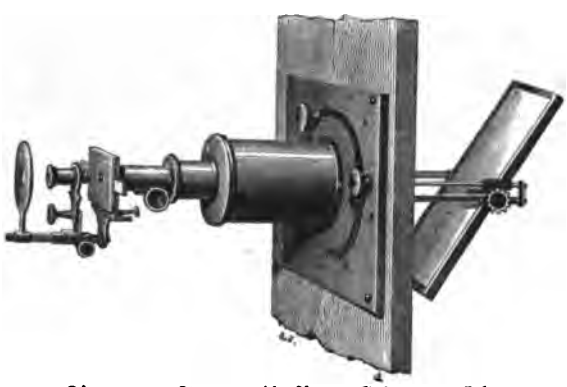


Fig. 224. Sonnenmikroskop. Gesammtansicht.

Digitized by Google

Endlich rechnen wir hierher noch die Sonnen- und Gasmikroskope, welche von sehr kleinen Gegenständen bedeutend vergrößerte Bilder auf eine Wand werfen. Der Haupttheil dieser Instrumente besteht auch wieder in einer einfachen oder zusammengesetzten Linse von sehr kurzer Brennweite, durch welche das Bild der Gegenstände, die sich nur wenig jenseits des Brennpunktes befinden, sehr vergrößert erscheint. Wegen der starken Vergrößerung ist es nothwendig, daß die Gegenstände durch sehr helles Licht erleuchtet werden: man sammelt daher entweder Sonnenlicht, das man durch einen Planspiegel in die Richtung der Röhre gelenkt

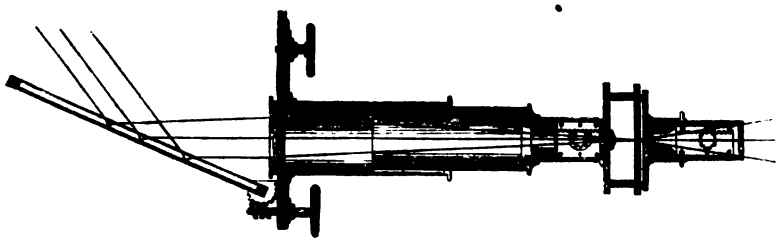


Fig. 225. Durchschnitt des Sonnenmikroskopes.

hat, oder auch ein starkes künstliches Licht durch eine Linse so, daß die ganze Fülle desselben auf den Gegenstand der Untersuchung fällt. Die Anordnung der Theile eines Sonnenmikroskopes läßt sich aus Fig. 224 und 225 leicht verstehen. Vergleicht man die Abbildungen sehr feiner Naturkörper, wie der niedrigsten Thier- und Pflanzenformen, der Gewebe im Thier- und Pflanzenreiche, die sich in älteren Werken vorfinden, mit den Darstellungen in neueren Werken, so erkennt man den großen Einfluß, den die Vervollkommnung jener Instrumente auf die Erkenntniß der Natur ausgeübt hat.

Fünftes Kapitel.

Zerlegung des Lichtes.

§ 1. Zerlegung und Zusammensetzung des weißen Lichtes.

Der Grundtypus des Lichtes ist für uns das Licht der Sonne, an welches wir immer zuerst denken, wenn überhaupt vom Lichte die Rede ist: wir bezeichnen dasselbe als weißes Licht, und in ihm zeigt sich diese Farbe in ihrer vollsten Reinheit. Unterwerfen wir nun dieses Licht einer

Digitized by Google

Prüfung, so finden wir leicht, daß es durchaus kein einfaches Licht ist, sondern aus einer sehr großen Zahl von Farben und Farbennüancen besteht, deren jede aus selbstständigen, gleichartigen Strahlen zusammengesetzt ist. Wir gehen jetzt zu den wichtigsten Versuchen über, durch welche der Beweis für die Zerlegbarkeit des weißen Lichtes geführt wird, und die in der Hauptsache von Newton herrühren.

Läßt man das Licht der Sonne durch eine Oeffnung in ein dunkles Zimmer fallen und fängt man es auf einem Schirme auf, der selbst

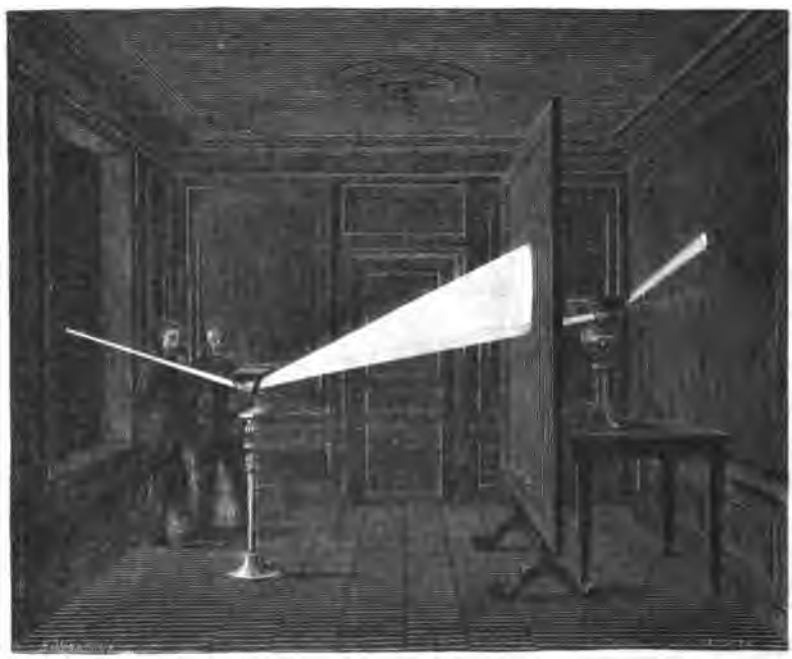


Fig. 226. Zerlegung des weißen Lichtes durch ein Prisma. Verschiedene Brechbarkeit der Farben.

von weißer Farbe ist, so sieht man auf demselben einen runden Fleck, der die weiße Farbe des Sonnenlichtes in der größten Reinheit zeigt, da dieselbe nicht durch fremde, reflectirte Strahlen getrübt sein kann, wie es wohl stattfindet, wenn man das Sonnenlicht im Freien auf dem Schirme auffängt. Bringt man nun in den Weg des Lichtbündels ein Prisma aus irgend einer brechenden Substanz, das man so aufstellt, daß die brechende Kante horizontal liegt und sich an der unteren Seite befindet, so sieht man auf dem Schirme an Stelle des weißen runden Fleckes, in einiger Entfernung über demselben einen länglichen, hell-

Digitized by Google

leuchtenden Streifen, welcher nicht mehr weiß erscheint, sondern seiner ganzen Länge nach die prachtvollsten Farben zeigt: dieser leuchtende Streifen heißt Sonnenspectrum (Fig. 226).

Die Farben, aus denen das Spectrum besteht, sind nicht scharf von einander geschieden, sondern sie gehen ohne Unterbrechung (mit Ausnahme einiger feiner, schwarzer Linien, auf die wir später zu sprechen kommen) in einander über, indem sie sich ganz unmerklich gegen einander abstufen. Die Zahl der Farbennüancen ist daher eigentlich unendlich groß: man ist aber längst dahin übereingekommen, sieben Hauptfarben zu unterscheiden, welche in der Richtung von unten nach oben bei dem vorstehenden Versuche in dieser Ordnung auf einander folgen: Roth, Orange, Gelb, Grün, Blau, Indigo, Violet. Tafel VIII Fig. 1 zeigt das Spectrum, wie es durch ein Prisma aus Schwefelkohlenstoff entsteht.

Diese Erscheinung, welche man die Farbenzerstreuung oder Dispersion des Lichtes nennt, zeigt sich in vielen Fällen, die von Alters her bekannt sind, ohne daß man dieselben zu erklären verstand. Aus ihr erklärt sich die schönste Eigenschaft der Edelsteine, besonders des Diamanten, welcher durch seine Flächen das Licht bricht und zerstreut und dadurch in den herrlichsten Farben glänzt. Ebenso zerstreut sich das Licht in den Tropfen der Regenwolke und bildet den Regenbogen, dessen Entstehung wir ausführlicher besprechen werden, wenn wir die physikalischen Erscheinungen der Atmosphäre behandeln. Endlich sehen wir diese Farbenzerstreuung bei jeder geschliffenen Wasserflasche, bei jedem kantigen Stück Glas, wie es z. B. an die Kronleuchter gehängt wird.

Bringt man in dem Schirme an der Stelle, an welcher sich das Spectrum befindet, eine kleine Oeffnung an, durch welche nur ein dünnes Bündel von bestimmter Färbung hindurch dringt und stellt man einen zweiten Schirm dahinter auf, so sieht man auf diesem zweiten Schirme einen kleinen erleuchteten Fleck von der Farbe des Strahlenbündels (Fig. 226). Stellt man nun, nachdem man sich die Stelle, an welcher der Fleck entstand, genau bezeichnet hat, in den Weg des Bündels ein zweites Prisma, so erleiden die Strahlen eine neue Brechung, und man sieht weiter oben auf dem Schirme einen hellen Fleck, welcher aber nur die Farbe des Strahlenbündels besitzt. Ist daher das Sonnenlicht einmal in seine Farben zerlegt, so läßt sich jede einzelne dieser Farben nicht weiter zerlegen: sie besteht aus gleichartigem oder homogenem Lichte.

Digitized by Google

Die Untersuchung der einzelnen Farben zeigt weiter, daß die Strahlen verschiedener Färbung auch verschiedene Brechbarkeit besitzen: die rothen Strahlen werden am wenigsten, die violetten am stärksten abgelenkt.

Verfertigt man Prismen aus verschiedenen durchsichtigen, festen Körpern, oder füllt man hohle Glasprismen mit verschiedenen Flüssigkeiten, so zeigen die Spectra, welche entstehen, für die verschiedenen Substanzen ungleiche Längenausdehnung, und auch die Lebhaftigkeit der Farben ist eine verschiedene. Unter den festen Körpern geben der Diamant und das Flintglas, eine mit Bleioxyd versetzte feine Glassorte, die ausgedehntesten und lebhaftesten Prismen: unter den Flüssigkeiten hat der Schwefelkohlenstoff diese Eigenschaft. Besitzt ein brechender Körper selbst eine eigenthümliche Färbung, so werden die Farben im Spectrum nicht mit gleicher Intensität auftreten, ja es können sogar einige ganz fehlen: die Reihenfolge der vorhandenen Farben bleibt aber immer dieselbe.

Wenn sich das weiße Licht der Sonne auf diese Art in Farben zerlegen läßt, so liegt die Vermuthung nahe, daß weißes Licht entstehen muß, wenn man alle diese Farben wieder mit einander vereinigt. Auch diese Annahme wird vollständig durch Versuche bestätigt, die der Hauptsache nach ebenfalls von Newton herrühren.

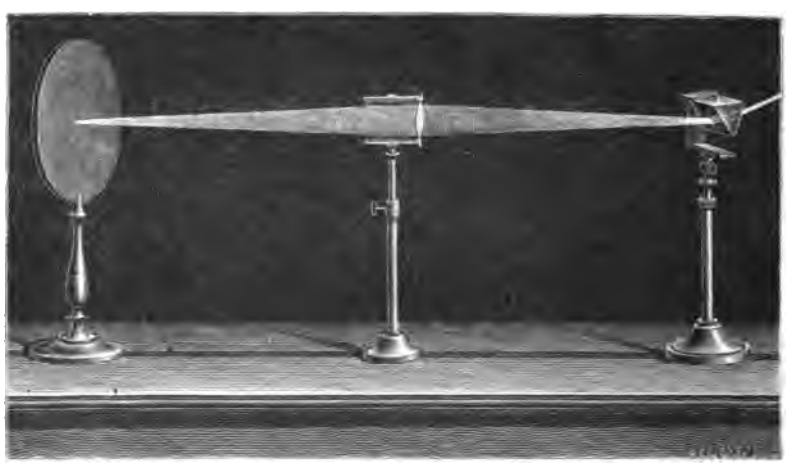


Fig. 227. Vereinigung der farbigen Lichtstrahlen durch eine Linse.

Der einfachste Versuch besteht darin, daß man in den Weg des Strahlenbündels, welches durch ein Prisma zerlegt ist, eine Sammellinse aufstellt und hinter dieser einen Schirm an den Punkt bringt, der dem Punkte, wo die Strahlen das Prisma verlassen, conjugirt ist (Fig. 227).

Digitized by Google

Hat man diesen Punkt genau getroffen, so erscheint auf dem Schirme ein vollständig weißes Sonnenbild. Nähert man nun den Schirm der Linse, so erscheinen die Farben wieder, und zwar um so lebhafter, je größer die Annäherung ist: liegt hierbei die brechende Kante des Prisma nach unten, so befindet sich das Roth auf der unteren, das Violet auf der oberen Seite, wie vor dem Durchgange durch die Linse. Entfernt man den Schirm jenseits des Concentrationspunktes des Lichtes, so zeigen sich ebenfalls die Farben, aber in umgekehrter Reihenfolge.

Auch wenn man die Strahlen, die durch ein Prisma zerlegt waren, durch ein zweites Prisma brechen läßt, welches dem ersten vollständig gleich ist, sich aber in umgekehrter Lage befindet, so erscheint wieder weißes Licht (Fig. 228). Denn jeder Strahl, welcher durch das erste Prisma in eine neue Richtung gelenkt war, wird durch das zweite Prisma in seine ursprüngliche Richtung wieder zurückgebrochen, sodaß die Strahlen von verschiedener Farbe das zweite Prisma in paralleler Richtung verlassen und sich daher zu weißem Lichte vereinigen. Fängt man das Strahlenbündel auf einem Schirme auf, so sieht man auf demselben ein weißes Sonnenbild, das nur an seinem unteren Rande einen schmalen rothen, am oberen Rande einen ebensolchen violetten Saum besitzt. Diese letztere Erscheinung rührt daher, daß sich die einzelnen Sonnenbilder von verschiedener Farbe nicht mehr genau decken, da beim Durchgange durch die beiden Linsen die violetten Strahlen etwas stärker verschoben werden, als die rothen, sodaß am oberen Rande die violetten, am unteren die rothen etwas übergreifen und nur in der Mitte ein Ausgleich der Farben stattfindet.

Fig. 228. Vereinigung der farbigen Lichtstrahlen durch ein Prisma.

Durch diese und ähnliche Versuche vereinigte Newton die Farben, in welche das Sonnenlicht durch ein Prisma erst zerlegt war, wieder zu weißem Lichte: weiter dehnte er aber seine Untersuchungen auch noch auf andere Farben aus, die mit einer größeren Selbständigkeit aufzutreten scheinen. „Bisher, sagt er im ersten Buche seiner Optik, habe

Digitized by Google

ich weißes Licht dadurch erzeugt, daß ich die Farben des Prisma wieder miſchte. Um nun auch die eigenthümlichen Farben der Naturkörper zu miſchen, nehme man Waſſer, das durch aufgelöſte Seife ziemlich zähe iſt, und ſchlage es zu feinem Schaum. Hat ſich dieſer Schaum ein wenig geſetzt, ſo braucht man ihn nur aufmerkſam zu betrachten, um zu ſehen, daß jedes Bläschen, aus dem er beſteht, in einer beſonderen Farbe ſpielt. Entfernt man ſich nun ſo weit, daß es nicht mehr möglich iſt, die Farben der einzelnen Bläschen von einander zu unterſcheiden, ſo erſcheint der Schaum wieder vollkommen gleichmäßig weiß gefärbt."

Ebenſo verſuchte er weißes Licht dadurch herzuſtellen, daß er feine Pulver von verſchiedener Farbe mit einander miſchte: er nahm hierzu orangefarbenes Auripigment, Purpur, Grünſpan und Laſurſtein, und erhielt aus dieſen Körpern eine Miſchung, welche aſchgraue Farbe beſaß. Setzte er dieſe Miſchung dem grellen Sonnenlichte aus und legte er daneben in den Schatten ein Stück weißes Papier, ſo erſchien das Pulver dem Papier gegenüber von blendender Weiße. Daß die Miſchung zunächſt grau erſcheint, erklärt Newton dadurch, daß jeder einzelne der gemiſchten Körper eine nicht unbedeutende Menge Licht abſorbirt, daß er alſo weit weniger von dem auffallenden Sonnenlichte zurückſendet, als das überall gleichmäßig weiß gefärbte Papier: um dieſe Verſchiedenheit auszugleichen, ließ er auf das Pulver das volle Sonnenlicht auffallen, während er das Papier im Schatten legte, wo es nur vom diffuſen Lichte getroffen wird.

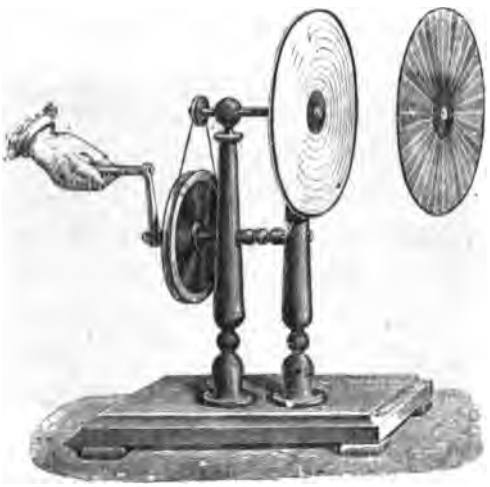


Fig. 229. Vereinigung der Farben einer ſich drehenden Scheibe.

Theilt man endlich eine kreisförmige Scheibe (Fig. 229) durch Radien in einzelne Sectoren, welchen man der Reihe nach die Hauptfarben des Spectrum giebt, und dreht man dieſelbe ſchnell um ihren Mittelpunkt, ſo erſcheint die Scheibe im Sonnenlichte nahezu weiß oder wenigſtens licht

Digitized by Google

grau, wenn die Farben gut getroffen sind und die einzelnen Streifen das richtige Breitenverhältniß haben. Denn ähnlich, wie unser Ohr den Eindruck eines Schalles eine Zeit lang festhält, so erlöscht auch der Lichteindruck nicht sofort in unserem Auge, sodaß auch das Bild einer Farbe der Scheibe noch nicht erloschen ist, bevor alle anderen Farben an ihre Stelle getreten sind: wir haben daher dieselbe Empfindung, als ob von jedem Punkte gleichzeitig Strahlen von allen Farben in unser Auge gelangten, d. h. die Scheibe erscheint uns in weißem Lichte. Läßt man die Scheibe im Dunkeln rotiren und erleuchtet man sie nur von Zeit zu Zeit durch elektrische Funken, so erscheinen bei jedem Blitze alle Farben von einander gesondert: ebenso treten die einzelnen Farben hervor, wenn man während der Rotation einen Pappstreifen, in dem sich einzelne Spalten befinden, zwischen dem Auge und der Scheibe hin und her bewegt.

So, wie sich die Strahlen, welche direct von der Sonne zu uns gelangen, in die Reihe der Spectralfarben zerlegen lassen, so gelingt dieselbe Farbenzerstreuung auch in gleicher Weise mit dem Lichte, welches wir so zu sagen erst aus zweiter Hand von der Sonne erhalten, welches uns z. B. von den Wolken, von dem Monde und den Planeten zurückgeworfen wird: auch bei ihm sehen wir dieselben Farben in derselben Reihenfolge, nur daß die Erscheinung weit weniger glänzend ist. Auch das Licht, das aus anderen Quellen stammt, wie das Licht der Sterne, der Flammen, des elektrischen Funkens unserer Maschinen sowohl, wie auch des Blitzes, giebt ein Spectrum, das mit dem Sonnenspectrum in der Anordnung der Farben übereinstimmt: nur fehlt nicht selten die eine oder andere Farbe, in welchem Falle dann im Spectrum dunkle Streifen erscheinen, die genau so breit sind, als die fehlende Farbe des vollständigen Spectrum.

Wird das weiße Licht durch ein Prisma in seine Farben zerlegt, so kann dies nur dadurch geschehen, daß die einzelnen Strahlen einen verschiedenen Grad von Brechung erleiden: es folgt also schon aus diesem Grundversuche, daß die Brechbarkeit der einzelnen Farben eine verschiedene ist, daß für irgend eine brechende Substanz der Brechungsexponent der rothen Strahlen kleiner sein muß, als der der violetten Strahlen. Diesen Satz kann man aber auch noch durch einige Versuche direct beweisen. Färbt man eine Hälfte eines Stückes Papier roth, die andere

Digitized by Google

blau, und betrachtet man daſſelbe durch ein Prisma, deſſen brechende Kante nach oben liegt, ſo ſcheinen durch daſſelbe die beiden Hälften nicht

Fig. 230. Verſchiedene Brechbarkeit der Farben.

mehr genau an einander zu paſſen, ſondern die blaue Hälfte ſcheint höher gehoben zu ſein, als die rothe, das Blau wird alſo ſtärker abgelenkt, als das Roth (Fig. 230).

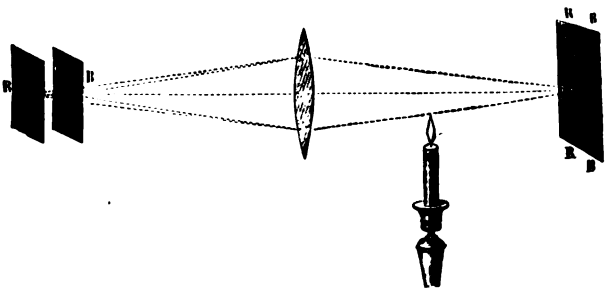


Fig. 231. Newton's Verſuch über die verſchiedene Brechbarkeit der Farben.

Stellt man daſſelbe Papier, indem man es durch eine Kerze gut beleuchtet, einer Sammellinſe gegenüber jenſeits der Brennweite derſelben

Digitized by Google

auf und läßt man das reelle Bild auf einem weißen Schirm entstehen, so muß man diesen Schirm in verschiedene Entfernungen rücken, je nachdem das rothe oder das blaue Bild in voller Schärfe entstehen soll. Um sehr genau zu erkennen, wann das eine oder andere Bild scharf erscheint, spannt man über das Papier schwarze Seidenfäden auf, welche bei der richtigen Einstellung scharf begrenzt sind, während ihre Ränder bei größerer Annäherung oder Entfernung verwaschen erscheinen. Man findet leicht, daß die Entfernung, in welcher das blaue Bild deutlich erscheint, geringer ist, als der Abstand, wo das rothe Bild seine größte Schärfe hat; also auch hier das Resultat, daß blaues Licht stärker gebrochen wird, als rothes. Diese beiden Versuche sind die ersten, die Newton in seiner Optik beschreibt.

§ 2. Die Farben der Körper.

Unter der natürlichen Farbe eines Körpers verstehen wir diejenige Farbe, unter der er uns erscheint, wenn er von sehr reinem, weißen Lichte, z. B. dem Lichte der Sonne, erleuchtet wird. Wirft die Oberfläche eines Körpers alle Farben in gleichem Verhältnisse möglichst stark zurück, so nennen wir ihn selbst einen weißen Körper, und zwar ist dieses Weiß um so vollkommner, je genauer das Intensitätsverhältniß der Farben eingehalten wird und je geringer die Zahl der vom Körper verschluckten und somit verschwundenen Strahlen ist. Bleibt das Verhältniß der Stärke, mit welcher die einzelnen Strahlen wiedergegeben werden, dasselbe, werden aber von den Strahlen mehr und mehr verschluckt, allein von allen Farben in gleichem Maße, so geht das Weiß in immer tieferes Grau über, welches sich endlich beim Verschwinden aller Farben in Schwarz verwandelt. Schwarze Körper sind also solche, deren Theilchen an der Oberfläche so angeordnet sind, daß sie alle Lichtstrahlen verschlucken oder absorbiren, sodaß gar kein Licht von ihnen zurückgeworfen wird: weiße Körper werfen die Strahlen von allen Farben in gleicher Vollkommenheit zurück. Hat dagegen die Oberfläche eines Körpers die Eigenthümlichkeit, daß sie die Strahlen von allen Farben des Spectrum, mit Ausnahme einer einzigen, z. B. das Roth, absorbirt, so erscheint sie uns selbst in dieser Farbe, im vorliegenden Falle also roth, weil sie vom

Digitized by Google

weißen Lichte, das auf sie fällt, nur die rothen Strahlen in unser Auge zurückwirft. Verschluckt sie dagegen nur eine beschränkte Zahl der farbigen Strahlen, so erscheint sie uns in der Farbe, die durch Mischung der nicht absorbirten Strahlen entsteht. Hieraus wird es erklärlich, daß die Zahl der Farbennüancen eine unendlich große ist, und daß es eine Menge von Farbenmischungen geben muß, die im Sonnenspectrum gar nicht enthalten sind. Ein farbiger Körper ist also ein solcher, der von dem auffallenden Lichte die Strahlen von gewisser Färbung absorbirt, die Strahlen der anderen Farben aber vollständig oder wenigstens zum Theil als diffuses Licht zurückwirft.

Läßt man auf einen weißen Körper nur die gelben Strahlen des Spectrum fallen, so erscheint er uns gelb gefärbt: ebenso halten wir ihn für einen rothen, grünen, blauen Körper, wenn nur rothe, grüne, blaue Strahlen auf ihn fallen. Ein schwarzer Körper dagegen bleibt schwarz, was für Licht ihn auch treffen möge. Besitzt ein Körper aber ausschließlich eine reine rothe Färbung, so wird er durch die rothen Strahlen des Spectrum im vollen Glanze leuchten, in allen anderen Strahlen dagegen wird er schwarz erscheinen. In den meisten Fällen ist aber die Färbung der Körper nicht eine so ausschließliche, daß alle farbige Strahlen, bis auf den einen, der mit der Farbe des Körpers übereinstimmt, vollständig verschluckt werden, sondern gewöhnlich giebt der Körper auch gewisse andere Farben wieder, nur in weit schwächerem Grade. Läßt man daher auf ihn Strahlen fallen, die mit seiner Färbung übereinstimmen, so wird er am deutlichsten sichtbar, er verschwindet aber auch nicht in anders gefärbtem Lichte, nur daß er uns dann viel matter erscheint. „Wird Zinnober den rothen Lichtstrahlen ausgesetzt, so erscheint er im glänzendsten Roth; im Orange oder Gelb erscheint er orauge oder gelb gefärbt, aber sein Glanz ist viel matter. Auch grüne Strahlen verleihen ihm noch ihre Färbung: da aber das Roth sehr wenig geeignet ist, grünes Licht zurückzuwerfen, so erscheint er düster und matt; und dies steigert sich noch im Blau, Indigo und Violet, sodaß er fast vollständig schwarz erscheint. Färbt man andererseits ein Stück Papier mit berliner Blau und setzt es den Strahlen des Indigoblau aus, so zeigt es eine außerordentlich lebhafte Färbung: im Grün wird es grün aber mit geringerem Glanze, und im Roth verschwindet es fast gänzlich.“ (Herschel). Newton's Erklärung der Färbung der

Digitized by Google

Körper ist also so zu verstehen, daß die Oberfläche farbiger Körper besonders geeignet ist, die Strahlen von einer gewissen Farbe in größerer Menge zurückzuwerfen, als die Strahlen der anderen Farben, daß aber auch die letzteren nicht vollständig absorbirt werden, sondern nur den ersteren gegenüber mehr zurücktreten: deshalb erscheinen auch die Körper gewöhnlich nicht vollkommen schwarz, wenn man sie auch Strahlen aussetzt, deren Farbe mit ihrer eigenen Färbung nicht identisch ist.

Die Farben der Körper stimmen selten mit denen des Sonnenspectrum genau überein, sondern sie sind selbst wieder zusammengesetzt; und man kann sich hiervon leicht überzeugen, wie man sie durch ein Prisma analysirt: auch in diesem Falle giebt die Analyse ein Spectrum, das aus verschiedenen Farben zusammgesetzt ist, deren Mischung die Färbung des Körpers bestimmt. Es genügt, daß man einen farbigen Gegenstand, eine Blume oder ein Stück Zeug, durch ein Prisma betrachtet, um zu sehen, daß die Ränder des Bildes, welche der Kante des Prisma parallel sind, in den Spectralfarben spielen.

Erleuchtet man einen farbigen Körper nicht durch das Licht der Sonne oder durch irgend eine der einfachen Farben, aus denen dieses Licht besteht, sondern durch irgend eine andere Lichtquelle, eine Lampe oder irgend eine Flamme, so erscheint die Färbung des Gegenstandes etwas verändert. So ist allgemein bekannt, daß sich Grün und Blau beim Lichte einer Kerze nicht so gut unterscheiden läßt, als beim Tageslichte: im Lichte der Kerze herrschen nämlich die gelben Strahlen vor, dem Blau wird also Gelb zugesetzt, sodaß es im Lichte der Kerze eine grünliche Färbung annimmt. Doch diese letztere Bemerkung gehört schon in die Lehre von der Mischung der Farben, zu der wir erst übergehen wollen, wenn wir auseinandergesetzt haben, wie Newton die Entstehung der Farben der Körper, welche nicht selbst leuchten, erklärt.

Newton nimmt an, daß das Licht, welches auf einen Körper trifft, an der Oberfläche desselben in zwei Theile zerlegt wird: der eine Theil dringt in den Körper ein und wird bei undurchsichtigen Körpern ausgelöscht, bei durchsichtigen Körpern aber frei hindurchgelassen; der andere Theil dagegen wird zurückgeworfen und zwar bei undurchsichtigen Körpern nur von den Molecülen, welche sich in der nächsten Nähe von der Oberfläche befinden, bei durchsichtigen aber von Molecülen aus beliebiger Tiefe. Hieraus erklärt sich zugleich, daß durchsichtige Körper häufig in

Digitized by Google

anderer Färbung erscheinen, wenn wir durch sie hindurch sehen, als wenn wir das Licht von ihnen zurückwerfen lassen: so haben wir erwähnt, daß sehr dünne Goldblättchen grünliches Licht hindurch lassen, während sie im zurückgeworfenem Licht gelb oder orangefarbig erscheinen. Als Halley in einer Taucherglocke mehrere Ellen tief unter das Wasser hinab gestiegen war, so erschien ihm die obere Fläche seiner Hand, auf welche das Sonnenlicht durch eine mit Glas geschlossene Oeffnung der Glocke fiel, lebhaft roth, während die untere Seite, welche durch das Licht erleuchtet wurde, das vom Wasser zurückgeworfen war, eine grüne Färbung besaß: hieraus schloß Newton, daß das Wasser die rothen Strahlen hindurchläßt, die grünen und blauen aber reflectirt.

Uebrigens muß man das Licht, welches regelmäßig von einer Oberfläche reflectirt wird, von dem unregelmäßig zurückgeworfenen oder diffusen Lichte wohl unterscheiden: die Färbung des ersteren wird durch den reflectirenden Körper in keiner Weise abgeändert, und wir wissen, daß die Bilder in gut polirten Spiegeln genau dieselbe Färbung besitzen, wie die gespiegelten Gegenstände; die Farbe des Stoffes, aus dem der Spiegel besteht, hat auf die Farbe des Bildes durchaus keinen Einfluß. Woher es nun kommt, daß das unregelmäßig zurückgeworfene Licht je nach der Natur der Körper eine bestimmte Färbung annimmt, darauf weiß die Wissenschaft zur Zeit noch keine genügende Auskunft zu geben.

Die verschiedenen Farben, in welche das Sonnenlicht durch das Prisma zerlegt wird, entsprechen, wie wir erwähnten, der verschiedenen Brechbarkeit der einzelnen Strahlen: ihre Zahl ist unendlich groß, da man von einem Ende des Spectrum bis zum andern durch unmerkliche Nüancen von einer Farbe zur andern gelangt. Allein es ist gebräuchlich geworden, unter diesen vielen Abstufungen sieben als die hauptsächlichsten Farben auszuzeichnen, und wir haben dieselben in ihrer natürlichen Reihenfolge bereits weiter oben aufgezählt. Da es jedoch gelang, einige dieser Farben dadurch herzustellen, daß man zwei andere mit einander mischte, da z. B. Grün durch Mischung von Gelb und Blau, Violet durch Mischung von Roth und Blau entsteht, so haben einige Physiker angenommen, daß im Grunde das Spectrum nur aus drei Grundfarben und deren Mischungen besteht. Nach Brewster würden diese Grundfarben das Roth, das Gelb und das Blau sein, nach Young dagegen das Roth, das Grün und das Violet: die Verhältnisse aber in welchen sich diese

Digitized by Google

Grundfarben in den verschiedenen Theilen des Spectrum mischen, würden die Verschiedenheit der Farbennüancen erklären.

Jetzt kommt man von dieser Ansicht zurück, und hält im Gegentheil jede einzelne Farbennüance des Spectrum für eine einfache Farbe oder ein Farbenelement; die Zahl dieser Farbenelemente ist daher unendlich groß, und nur aus praktischen Gründen, um der leichteren Bezeichnungsweise willen, hält man noch an den sieben Grundfarben fest. Das Weiß ist keine einfache Farbe, sondern unter allen zusammengesetzten Farben ist es diejenige, welche aus den meisten Farbenelementen besteht: das Schwarz ist gar keine Farbe, sondern der vollständige Mangel an jeglichem Lichte. Endlich die natürlichen Farben der Körper sind gewöhnlich aus ziemlich vielen Farbenelementen in sehr verschiedenen Mischungsverhältnissen zusammengesetzt.

Daß zur Herstellung des vollständigen Weiß alle Farbenelemente erforderlich sind, erkennt man aus der Färbung des Bildes, welches dadurch entsteht, daß man die durch ein Prisma zerstreuten Lichtstrahlen durch eine Linse sammelt, zuvor aber in dem Strahlenbündel die eine oder andere Farbe abblendet. „Blendet man in dieser Weise das Violet ab, so nimmt das Weiß einen gelblichen Schein an; unterdrückt man weiter auch noch das Blau und das Grün, so röthet sich das Gelb immer mehr und geht durch Orange zum Scharlach- und Purpurroth über. Beginnt man dagegen mit der Unterdrückung der Lichtstrahlen von dem rothen Ende des Spectrum her, so geht das Weiß in Hellgrün, sattes Grün, Blaugrün, Blau und endlich Violet über, wenn man die weniger brechbaren Lichtstrahlen der Reihe nach abblendet. Unterbricht man die mittleren Lichtstrahlen des Spectrum durch eine Blende, so geben die übrigen Strahlen, wenn sie sich vereinigen, die verschiedenen Abstufungen von Purpurroth, Kirschroth u. s. w., je nach den Strahlen, welche man unterdrückt hat. Dadurch, daß man gewisse Strahlen abblendet, kann man jede beliebige Farbe darstellen, welche man will, und es giebt in der Natur keine Nüance, welche man nicht auf diese Weise in einer Fülle und mit einem Glanze darstellen könnte, welche die künstlichen Farben niemals erreichen." (J. Herschel).

Man kann also dadurch, daß man ganz beliebige farbige Strahlen des Spectrum mit einander mischt, eine unendliche Menge von Farbennüancen darstellen: wir werden aber bald sehen, daß man die Zahl dieser

Digitized by Google

Abstufungen noch bedeutend erhöhen kann, wenn man eine bestimmte Menge weißes Licht beimischt, oder wenn man die Helligkeit des Lichtes so vermindert, daß sich die Farbe dem Schwarz nähert. Hat man eine bestimmte Anzahl Strahlen im Spectrum unterdrückt, so geben die übrigen bei ihrer Vereinigung eine bestimmte Mischfarbe: sammelt man nun wieder die Strahlen, welche man zuvor unterdrückt hatte, so erhält man eine zweite Mischfarbe von solcher Beschaffenheit, daß sie mit der ersten Farbe wieder vereinigt weißes Licht geben müßte. Zwei solche Farben, die sich zu weißem Lichte ergänzen, heißen Complementärfarben. Man kann leicht solche Complementärfarben herstellen, wenn man in den Weg des Strahlenbündels nach seinem Austritte aus der Sammellinse ein kleines Prisma einschaltet, durch welches eine Anzahl Strahlen eine neue Ablenkung erfahren, und wenn man diese Strahlen durch eine zweite Linse auf einem zweiten Schirme vereinigt: die beiden Bilder auf den Schirmen werden die Complementärfarben deutlich erkennen lassen.

Werden die Complementärfarben in dieser Weise dargestellt, so ist leicht einzusehen, daß sie bei ihrer Vereinigung wieder Weiß geben müssen, da sie ja alle Farbenelemente des weißen Strahles enthalten. Allein auch einfache Farben können bei ihrer Vereinigung auf unser Auge den Eindruck machen, als ob wir weißes Licht sehen, und Helmholtz hat durch eine Reihe von Versuchen gezeigt, daß die Zahl der Paare von einfachen Farben, die wir als Complementärfarben anzusehen haben, ebenfalls unbegrenzt ist: das Mittel, durch welches er die zusammengehörigen Strahlen auffand, bestand einfach darin, daß er im Wege der durch das Prisma zerstreuten Lichtstrahlen eine Blende mit zwei Spalten aufstellte und die beiden Strahlen, welche durch die Spalten hindurchgingen, durch eine Sammellinse in einem Punkte vereinigte. Dadurch, daß sich der eine Spalt etwas zur Seite verschieben ließ, war es immer möglich zu jedem Strahle den ihm complementären Strahl aufzufinden. Als Beispiele für complementäre Farben erwähnen wir Violet und Schwefelgelb, Indigo und Gelb, Blau und Orange, Blaugrün und Roth.

Um die Mischfarbe zu untersuchen, die entsteht, wenn zwei Strahlen von verschiedener Farbe in unser Auge dringen, giebt derselbe Physiker ein sehr einfaches Mittel an: legt man auf einen schwarzen Tisch zwei Scheiben, welche die beiden Farben tragen, deren Mischung man unter-

Digitized by Google

suchen will, und stellt man senkrecht zwischen beide ein nicht belegtes Spiegelglas, so kann man sich so aufstellen, daß man durch dieses Glas hindurch die eine Scheibe, zugleich aber auch das Spiegelbild der anderen Scheibe scheinbar an derselben Stelle erblickt; für unser Auge werden sich also beide Farben mit einander zu einem Ganzen vermengen. Färbt man z. B. die eine Scheibe mit Chromgelb, die andere mit Kobaltblau, so erscheinen sie in ihrer Vereinigung rein weiß: ein Beweis, daß diese Farben Complementärfarben sind.

Zwei Complementärfarben werden sich auch dann noch zu weißem Lichte ergänzen, wenn man ihnen auch eine beliebige Menge Weiß beimischt: anders dagegen, wenn man sie mit Schwarz vermischt, in welchem Falle ihre Mischung ein mehr oder weniger tiefes Grau zeigt. Wohlverstanden handelt es sich in allen diesen Fällen nur immer um die Mischung der farbigen Strahlen, nicht etwa um die der Stoffe, welche die Farben tragen: mischt man zwei Stoffe, deren Farben complementär sind, und die entweder in einer Flüssigkeit aufgelöst oder auch nur fein gepulvert sind, so darf man nicht erwarten, daß dieses Gemenge weiß erscheint, sondern seine Farbe wird höchstens als grau erscheinen, wenn sie nicht etwa noch eine ganz andere Farbennüance annimmt.

Wenn man nun auch zugeben muß, daß die Zahl der einfachen und zusammengesetzten Farben eine unbegrenzte ist, und daß man durch Beimischen von Weiß oder Schwarz in beliebiger Menge diese Zahl noch wieder ohne Ende vervielfältigen kann, so ist andererseits nicht zu leugnen, daß die Empfindlichkeit unseres Auges nicht in gleicher Weise bis ins Unendliche gehn wird, sondern daß wir nur eine beschränkte Zahl derselben deutlich unterscheiden können. Gleichwohl, wenn es möglich wäre, alle die einzelnen Farbennüancen, welche die Natur uns darbietet und die unser Auge noch deutlich von einander trennen kann, in einer Uebersicht zusammen zu stellen, so würden wir in das größte Staunen versetzt werden über den Reichthum und die Mannigfaltigkeit dieser Musterkarte: die Blätter und Blüten der Pflanzen, das Pelzwerk der Thiere, die glänzenden Farben im Federkleide der Vögel, die Flügel der Schmetterlinge und anderer Insecten, die fein abgestuften Farben mancher Mineralien und der Muscheln, alle diese Naturkörper würden uns die Elemente zu einer Reihe natürlicher Farben liefern, die kein Ende erreicht, und in welcher man durch unmerkliche Abstufung von einer Nüance zur

Digitized by Google

anderen gelangt, und diese Reihe würde in ihrer ganzen Ausdehnung nur aus Körpern bestehen, die wir der Natur selbst entnehmen.

Die Zahl der Farben, die in der Kunst zur Anwendung kommen, ist sicher viel beschränkter, doch kann man sich davon, wie bedeutend auch sie ist, eine Vorstellung machen, wenn man bedenkt, daß nach den Berichten der Alten bei der Anfertigung der römischen Mosaiken mehr als 30000 Nüancen unterschieden wurden. Sollten auch diese Berichte etwas übertreiben, so ist doch soviel sicher, daß die Zahl eine so ungeheure ist, daß das dringende Bedürfniß entsteht, eine rationelle Classification derselben aufzustellen, durch welche es möglich ist, nach bestimmten Grundsätzen jede Nüance auf einige Grundtypen zurückzuführen und anzugeben, wie sie aus denselben abgeleitet werden kann. Die Bezeichnungsweise der Farben, wie sie in der Industrie und Kunst eingeführt ist, kann zu diesem Zwecke nicht genügen, da sie viel zu willkürlich ist: entlehnt sie doch ihre Namen den verschiedensten Naturkörpern, Mineralien, Pflanzen, Thieren, den chemischen Bestandtheilen (wir erinnern nur an Anilinroth), den Fabrikorten, (berliner Blau, schweinfurter Grün), ja selbst ganz äußerlichen Beziehungen, wofür das Magentroth und Bismarckbraun wohl die merkwürdigsten Beispiele sind. Um diese Unsicherheit und Unklarheit zu zerstören, hat der berühmte Chemiker Chevreul einige Grundsätze aufgestellt, nach denen die Farben in ihren verschiedenen Abstufungen sich möglichst genau unterscheiden lassen.

Nach Chevreul kann die Färbung eines Stoffes, der ursprünglich eine Farbe, wie sie im Spectrum vorkommt, in aller Reinheit besitzt, durch folgende vier Mittel abgeändert werden:

1. Mischt man Weiß bei, so wird die Färbung lichter, zugleich aber verschwindet die specifische Farbe immer mehr;

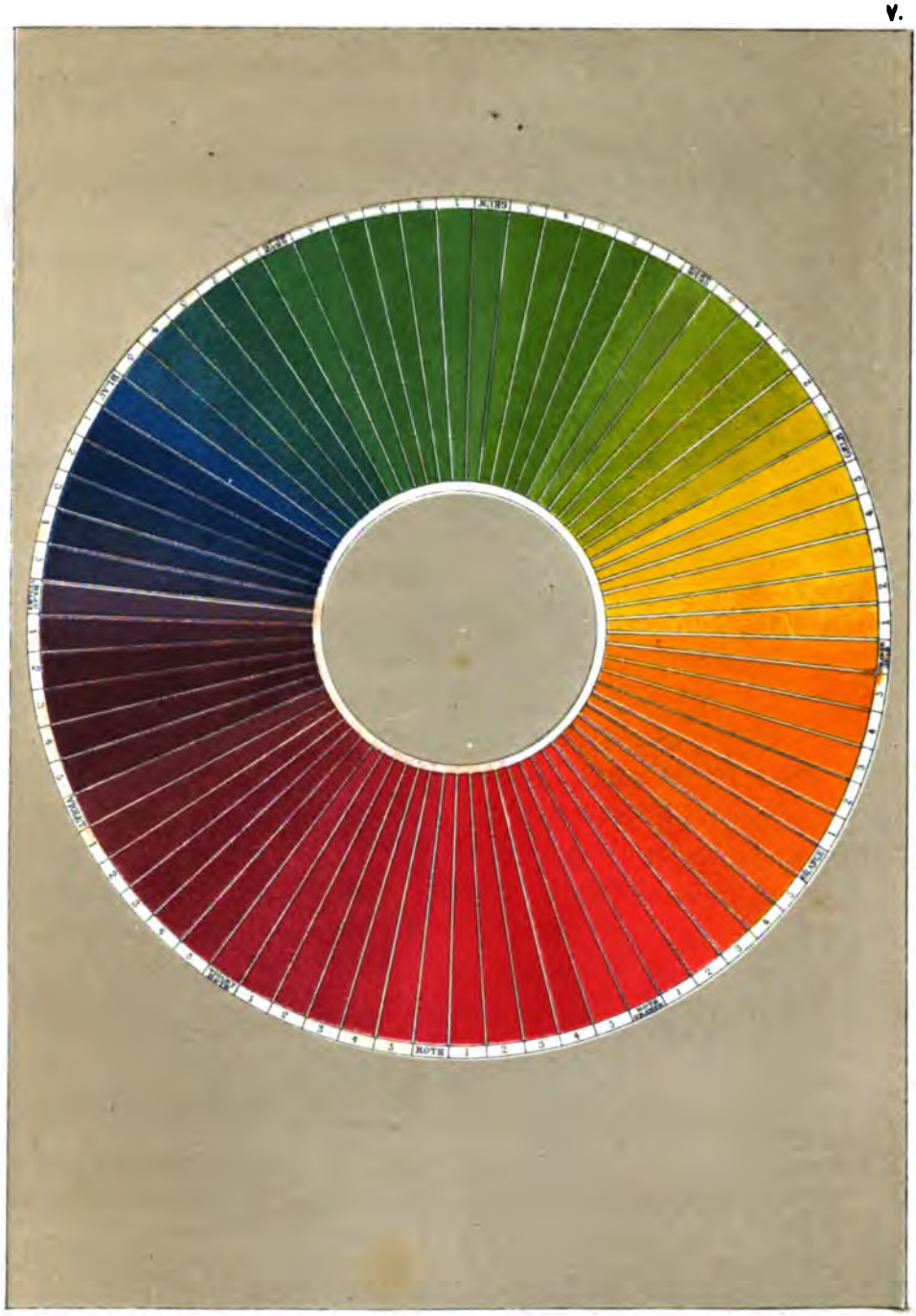
2. Durch Beimischung von Schwarz verschwindet ebenfalls die specifische Farbe, ohne jedoch durch anderes Licht ersetzt zu werden;

3. Verbindet man die gegebene Farbe mit einer anderen, ebenfalls reinen, Spectralfarbe, so kann dies geschehen, ohne daß die Mischung an Helligkeit eingebüßt hat, oder endlich

4. Die Vereinigung zweier Spectralfarben giebt eine Mischfarbe, die zugleich an Helligkeit eingebüßt hat, was so weit getrieben werden kann, daß schließlich Schwarz entsteht.

Um für diese Modificationen bestimmte Namen einzuführen, bezeichnet

Digitized by Google



CLASSIFICATION DER FARBEN

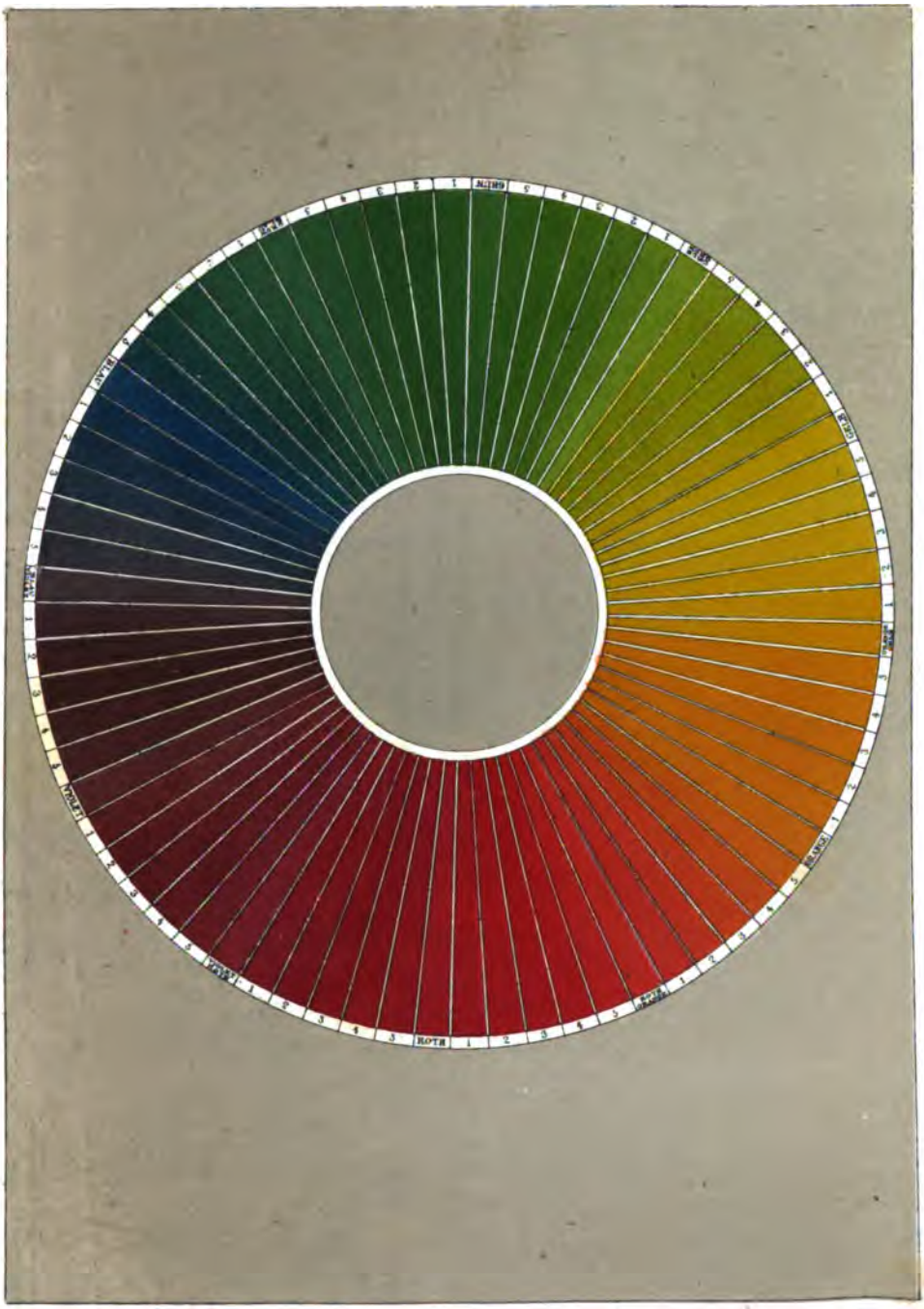
nach Chevreul's System.

REINE FARBEN.

Digitized by Google

Digitized by Google

VI.



Lith. Anst. v. H. Arnold, Leipzig

CLASSIFICATION DER FARBEN

nach Chevreul's System.

FARBEN, DIE DURCH BEIMISCHUNG VON ⅒ SCHWARZ GEDÄMPFT SIND.

Digitized by Google

Digitized by Google

FARBENSCALA

DES VIOLET UND DES GELB

Digitized by Google

LIBRARY
OF THE
UNIVERSITY
OF

Digitized by Google

er die Abstufungen einer und derselben Farbe, welche sich nur durch den Zusatz von Weiß oder Schwarz unterscheiden, als Töne dieser Farbe, eine Reihe solcher Töne aber nennt er eine Tonleiter und rechnet dieselbe aufsteigend von der reinen Farbe bis zum Weiß, absteigend aber bis zum Schwarz. Die Abänderung dagegen, welche durch Zusatz einer anderen reinen Farbe herbeigeführt wird, ohne daß Verdunkelung eintritt, heißt Nüance.

Um nun zunächst eine große Anzahl von Nüancen zu erhalten, theilt er die Fläche eines Kreises in 72 gleiche Sectoren und legt auf drei dieser Sectoren, welche gleich weit von einander abstehen, wollene Streifen, von denen der eine roth, der zweite gelb und der dritte blau in möglichst reinen Farben und mit gleicher Intensität gefärbt ist. Zwischen diese Streifen legt er weiter in gleichem Abstande einen orangefarbenen Streifen zwischen dem rothen und gelben, einen grünen zwischen dem gelben und blauen und einen violetten zwischen dem blauen und rothen. Auf diese Weise schaltet er immer neue Nüancen zwischen je zwei bereits aufgefundene ein, und erhält dadurch den Kreis der reinen Farben, welcher einigermaßen als eine Nachbildung des Sonnenspectrum angesehen werden kann: Tafel V giebt eine Abbildung dieses Kreises.

Nachdem auf diese Weise 72 Nüancen gebildet worden sind, wird für jede dieser Nüancen dadurch, daß man immer größere Mengen von Weiß oder Schwarz hinzusetzt, eine vollständige Tonleiter hergestellt, und zwar bildet Chevreul für jede Nüance eine Tonleiter aus 20 verschiedenen Tönen, welche von Weiß bis Schwarz reicht, sodaß der zehnte Ton immer die reine Farbe ist: Tafel VII stellt die Tonleiter für Gelb und Violet dar, Tafel VI dagegen giebt den Farbenkreis für die Farben, welche durch Zusatz von $^{4}/_{10}$ Schwarz erniedrigt sind.

Es ist klar, daß eine Tafel von solcher Ausdehnung für alle Zwecke der Wissenschaft und der Industrie vollständig ausreichen muß, und daß sie die Bedürfnisse der Künstler auf lange Zeit hin vollständig befriedigt: die genaue Herstellung aller dieser Farben ist aber mit ungeheuren Schwierigkeiten verbunden, und ebenso schwer ist es auch, die einmal angenommenen Typen festzustellen, sodaß kaum zu erwarten ist, daß den Künstlern und Gewerbtreibenden jemals eine Tafel in die Hand gegeben werden kann, welche die Farbennüancen und Töne für alle Zeiten unzweifelhaft feststellt.

Digitized by Google

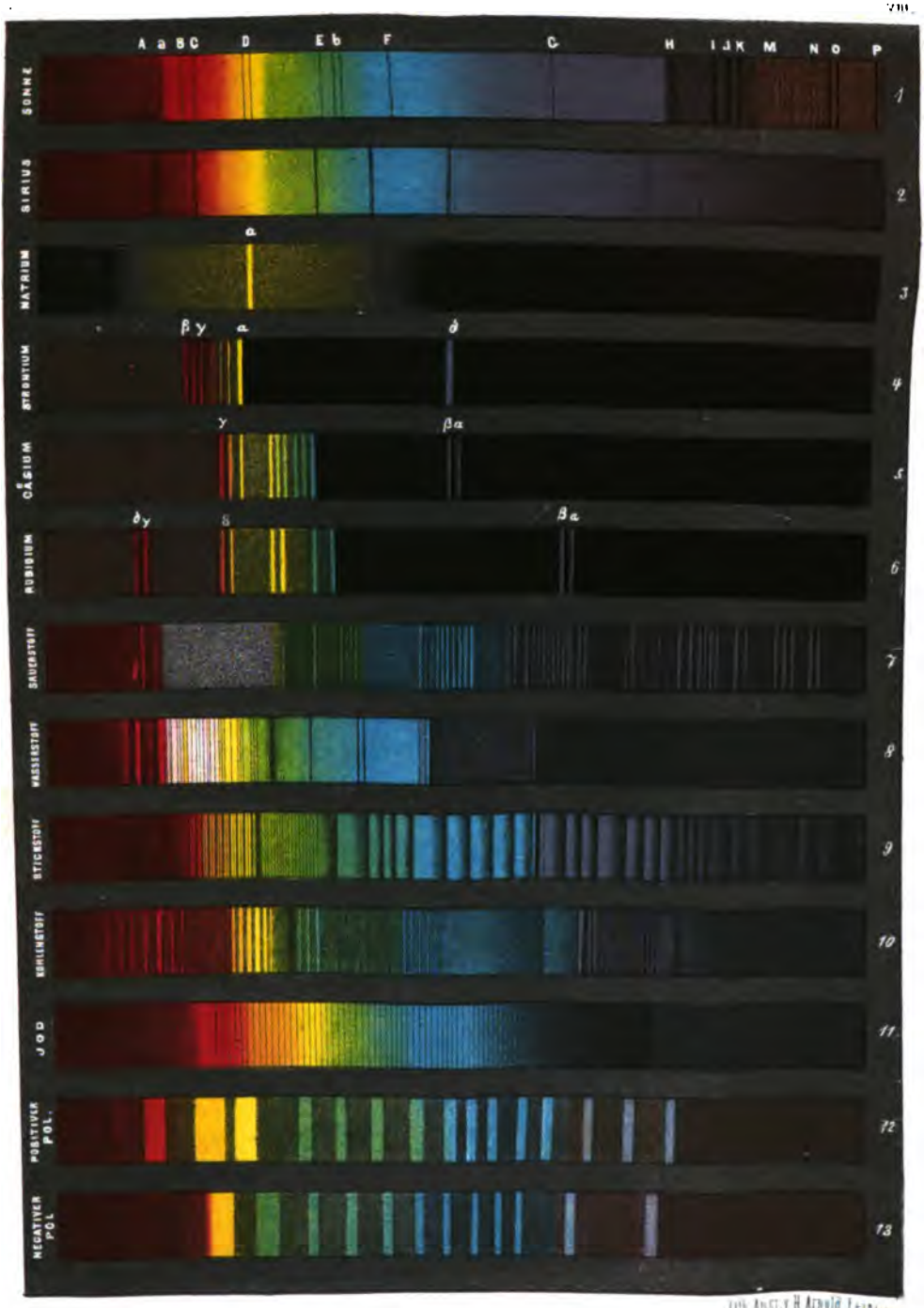
§ 3. Die Streifen im Sonnenspectrum. — Die Spectralanalyse.

Wir kommen jetzt zu einer der wichtigsten Entdeckungen, welche Veranlassung geworden ist, daß der Wissenschaft in den letzten Jahrzehnten ein ganz neues Gebiet eröffnet wurde, und welche wir einem Manne verdanken, der sich durch eigene Kraft und eisernen Fleiß zu einer bedeutenden Höhe in der Wissenschaft empor gearbeitet hat. Wir meinen Joseph Fraunhofer, welcher im Jahre 1787 zu Straubing als der Sohn eines einfachen Glasers geboren, sich vom einfachen Glasschneider zum gelehrtesten und geschicktesten Optiker unseres Jahrhunderts aufschwang. Denn nicht allein, daß seine optischen Instrumente, besonders seine Fernrohre, mit Recht als die besten allenthalben bekannt und verbreitet sind, so verdankt ihm die Wissenschaft auch eine Reihe von Entdeckungen, unter denen wir jetzt die Auffindung der schwarzen Streifen im Sonnenspectrum erwähnen wollen.

Als Newton die verschiedenen Partien des Sonnenspectrum untersuchte, so konnte er nirgends einen Punkt finden, der als scharfe Grenze der einzelnen Farben angesehen werden konnte: dieselben schienen allmählich und ohne Unterbrechung in einander überzugehen. Daher nahm er an, daß das weiße Licht aus Strahlen bestehe, welche alle möglichen Grade der Brechbarkeit besitzen, und daß es durch das Prisma in eine Reihe von Strahlen aufgelöst werde, welche nirgends eine Lücke zeige. Fraunhofer wiederholte Newton's Versuche in der Absicht, für die einzelnen Farben die genauen Brechungsexponenten bei Anwendung bestimmter Glassorten aufzufinden, und als er sich nach auffälligen Punkten im Sonnenspectrum umsah, bemerkte er, daß dasselbe gar nicht einen ununterbrochenen farbigen Streifen bildete, sondern von einer Anzahl feiner, schwarzer Linien durchzogen wird, welche sehr scharf begrenzt sind und als deutliche Marken für die Untersuchung der Brechung der einzelnen Farben dienen können.

Zu diesen Untersuchungen, welche große Sorgfalt erheischen, benutzte Fraunhofer zunächst ein Prisma aus Flintglas, dessen Flächen mit der größten Sauberkeit glatt geschliffen und fein polirt waren, und ließ auf dasselbe das Sonnenlicht durch eine enge Spalte fallen, welche der brechenden Kante des Prisma parallel war. Die gebrochenen Strahlen fing

Digitized by Google



SPECTRA

VERSCHIEDENER LICHTQUELLEN

1 DER SONNE 2 EINES STERNES. 3-11. EINIGER CHEMISCHER ELEMENTE
12.13 DES ELEKTRISCHEN LICHTES AN BEIDEN POLEN.

Digitized by Google

BRARY
OF THE
VERSITY
OF

Digitized by Google

er mit einem Fernrohre auf und erblickte in diesem das vergrößerte Bild des Spectrum, in welchem sich an bestimmten Stellen, parallel zur brechenden Kante, die schwarzen Streifen zeigten, die man nach ihrem Entdecker als Fraunhofer'sche Linien bezeichnet. Die Versuche wurden nun insofern abgeändert, daß Prismen aus anderen Glassorten und verschiedenen durchsichtigen Substanzen an Stelle des Flintglasprisma eingeschaltet wurden, allein jedesmal, wenn das Licht der Sonne untersucht wurde, mochte dasselbe directes oder reflectirtes Licht sein, zeigten sich dieselben Linien genau an denselben Stellen, in denselben Farben des Spectrum.

Im weiteren Verfolge seiner Entdeckung gelang es Fraunhofer im Ganzen 580 solcher dunkler Linien im Sonnenspectrum aufzufinden und nach ihrer gegenseitigen Lage zu bestimmen, von denen er die acht stärksten zur leichteren Orientirung mit dem Buchstaben A-H bezeichnete. Auf Tafel VIII sind diese Linien eingezeichnet, und man sieht, daß sich die Linien A, B und C in Roth, D, welche sich leicht in zwei Linien spalten läßt, im Gelb, E im Grün, F im Blau, G im Indigo und die Doppellinie H im Violet befindet.

Man könnte hier die Frage aufwerfen, wie es denn kommt, daß ein so sorgfältiger Beobachter, wie Newton, dem auch schon recht gute optische Hülfsmittel zu Gebote ständen, diese Erscheinung übersehen hat, während man jetzt dieselbe schon mit verhältnißmäßig einfachen Apparaten zur Anschauung bringt. Vermuthlich liegt der Grund hierfür darin, daß man vor Fraunhofer das Licht durch einen zu breiten Spalt auf das Prisma fallen ließ: besitzt aber der Spalt eine gewisse Breite, so giebt jeder Streif desselben sein besonderes Spectrum, und jedes dieser Spectren ist gegen das nächstfolgende ein wenig verschoben und verdeckt die dunkeln Linien desselben durch Lichtlinien. Einige der dunkeln Linien hat Wollaston bereits im Jahre 1802 gesehen, wovon aber Fraunhofer bei seiner, im Jahre 1817 erfolgten, Entdeckung sicher nichts wußte. Später ist durch die Untersuchungen Brewster's, Kirchhoff's, Bunsen's und anderer Physiker eine große Zahl neuer Linien aufgefunden worden, sodaß man jetzt deren mehr als 3000 kennt. Um einen Begriff zu bekommen, wie reichhaltig das Sonnenspectrum an diesen Streifen ist, vergleiche man Fig. 232, welche nur die Linien darstellt, die zwischen den Hauptlinien D und E enthalten sind.

Digitized by Google

Fraunhofer wendete nun seine Methode, durch welche er die schwarzen Linien im directen Sonnenlichte gefunden hatte, auch auf die Untersuchung anderer Lichtstrahlen an, und zwar zunächst auf das Sonnenlicht, das erst auf andere Körper getroffen ist und von diesen zurückgeworfen wird, also z. B. das Licht, das uns die Wolken, die Lufttheilchen bei heiterem Himmel, der Mond und die Planeten zusenden. Wie zu erwarten war, und wie wir bereits erwähnten, fand er in allen diesen Fällen dieselben Streifen, wie beim directen Sonnenlichte, nur waren sie in demselben Maße schwerer zu erkennen, als die Spectra lichtschwächer wurden. Richtete er dagegen sein Instrument nach einem Fixstern, z. B. dem Sirius (Tafel VIII, 2) so fand er zwar auch ein Spectrum, das von dunklen Streifen durchsetzt ist, allein diese Streifen stimmen nicht durchaus mit den Streifen des Sonnenspectrum, und auch in den Spectren der einzelnen

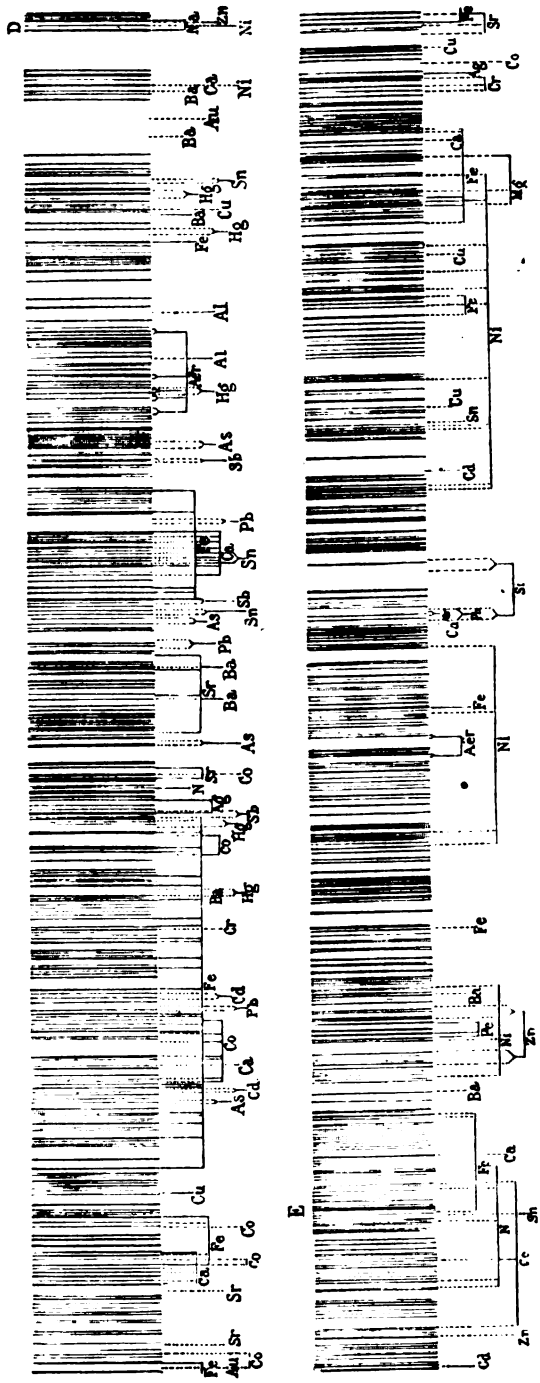


Fig. 232. Dunkle Linien im Sonnenspectrum zwischen den Linien D und E.

Digitized by Google

Sterne haben sie verschiedene Lagen. Das Licht elektrischer Entladungen endlich gab nicht ein Spectrum mit nur einzelnen schwarzen Streifen, sondern dafür nur einzelne farbige Streifen.

Diese wichtigen Untersuchungen bildeten den Ausgangspunkt für eine Reihe von glänzenden Entdeckungen, welche in ihrer Gesammtheit jetzt einen der wichtigsten Zweige der Optik bilden und zugleich der Chemie ein höchst sinnreiches und außerordentlich empfindliches Mittel zur Analysirung der Stoffe darbietet: wir meinen die Spectralanalyse, mit welcher sich die nächstfolgenden Seiten beschäftigen sollen.

Die Spectra der Sonne und der Fixsterne zeigen, wie wir gesehen haben, einen farbigen Streifen, der sich durch alle Farben vom Roth bis zum Violet erstreckt, der aber von einer Reihe dunkler Linien unterbrochen wird, welche beweisen, daß die Strahlen, die von jenen Lichtquellen ausgehen, nicht alle Grade von Brechbarkeit besitzen, sondern, daß zwischen ihnen Sprünge in Bezug auf diese Eigenschaft vorkommen, welche sich durch die Lücken im Spectrum bemerklich machen. Untersucht man dagegen das Licht, welches von weißglühenden festen oder flüssigen Körpern ausgeht, so zeigt das farbige Spectrum desselben in seiner ganzen Ausdehnung durchaus keine Unterbrechung: es ist ein continuirliches Spectrum. Ganz anders gestaltet sich die Erscheinung, wenn sich die Lichtquellen im luftförmigen Zustand befinden. Bringt man in eine Gas- oder Alkoholflamme gewisse Substanzen, welche ein Metall enthalten, das sich in der hohen Temperatur verflüchtigt, so giebt diese Flamme nicht mehr ein continuirliches Spectrum, sondern es leuchten nur einzelne helle Streifen auf, welche durch breite, dunkle Zwischenräume von einander getrennt sind. Durch ausgedehnte Untersuchungen hat man gezeigt, daß jedes Metall bei seiner Verflüchtigung eine gewisse Anzahl farbiger Streifen entstehen läßt, deren Lage im Spectrum eine ebenso feste und unveränderliche ist, wie die Lage der schwarzen Streifen im Sonnenspectrum: noch mehr, man hat gezeigt, daß die Lage vieler heller Streifen, die in dem Spectrum der Metalle vorkommen, mit der Lage dunkler Streifen des Sonnenspectrum genau übereinstimmen.

Zu derartigen Untersuchungen benutzt man einen Apparat, welcher Spectroskop heißt und in seinen wesentlichsten Theilen in Fig. 233 dargestellt ist. Vor der Axe eines Fernrohres befindet sich eine Gasflamme, deren Licht durch eine schmale Spalte in das Rohr eindringt

Digitized by Google

und am Ende desſelben durch ein Prisma gebrochen wird. Das Spectrum, welches beim Durchgange durch das Prisma gebildet wird, wird durch ein zweites Fernrohr betrachtet. Will man das Spectrum eines Metalles, z. B. des Natrium, mit Hülfe dieſes Apparates unterſuchen, ſo taucht man in die Gasflamme das Ende eines Platindrahtes, das zuvor mit einer Löſung eines Natriumſalzes benetzt wurde. In demſelben Augenblicke, wo der Draht die Flamme berührt, ſieht man durch das Fernrohr einen ſehr hellen, ſcharf begrenzten, gelben Streifen aufleuchten.

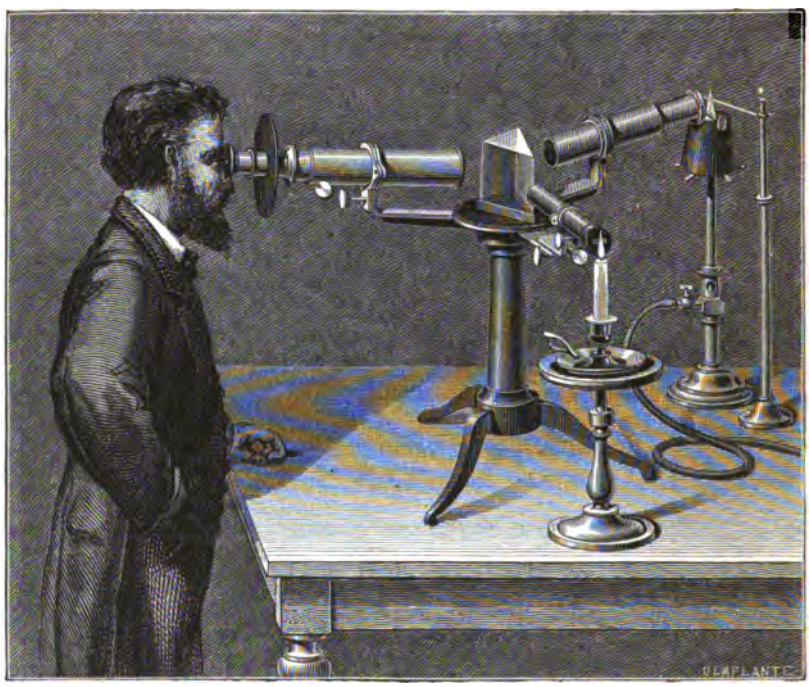


Fig. 233. Spectroſkop.

Bei ſtarker Vergrößerung erkennt man, daß dieſer Streifen durch eine ſchwarze Längslinie in zwei Theile zerfällt. Dieſer gelbe Doppelſtreifen iſt für das Natrium durchaus charakteriſtiſch, ſodaß ſein Erſcheinen ſtets auf die Anweſenheit eines Natriumſalzes ſchließen läßt: man nennt ihn daher das Spectrum des Natrium (Tafel VIII).

In derſelben Weiſe hat man auch für andere Metalle die charakteriſtiſchen Linien oder das Spectrum beſtimmt: ſo findet man für das Lithium eine ſchwache gelbe und eine lebhafte rothe Linie; für das Kalium eine rothe und eine violette, welche von mehreren ſchwachen gelben und

Digitized by Google

grünen Linien begleitet werden. Das Calcium giebt eine sehr lebhafte grüne, eine orangefarbene und eine blaue; das Strontium sechs rothe, eine orangefarbene und eine blaue; das Barium zwei grüne und das Thallium eine einzige grüne Linie von außerordentlich starkem Glanze.

Auf diese Weise hat man eine sehr große Anzahl von Stoffen untersucht und genau festgestellt, aus welchen farbigen Streifen ihre Spectra bestehen, sodaß man irgend einen Körper, den man untersuchen will, nur in die Flamme vor dem Spectroskope zu halten und sein Spectrum zu untersuchen braucht, um zu wissen, welche von den bereits untersuchten Elementen in ihm enthalten sind. Dabei ist der Apparat so empfindlich, daß der millionste Theil eines Milligrammes Natrium genügt, um sofort die gelbe Doppellinie, welche jenem Metalle charakteristisch ist, aufleuchten zu lassen. Man sieht, von welcher Tragweite diese Methode ist, die wir den Chemikern Kirchhoff und Bunsen verdanken. Der letztgenannte Gelehrte beschreibt in seinem Werke über Spectralanalyse einen Versuch, bei welchem er ein Gemenge aus den Chlorverbindungen des Natrium, Kalium, Lithium, Barium, Strontium und Calcium, das von jeder dieser Substanzen höchstens den hunderttausendsten Theil eines Milligrammes enthielt, der Flamme aussetzte und durch das Spectroskop beobachtete. Sofort zeigte sich die gelbe Natriumlinie auf dem Grunde eines sehr schwachen continuirlichen Spectrum; als dieselbe zu verblassen anfing, wurden die schwachen Linien des Kalium sichtbar; auf diese folgte für kurze Zeit die rothe Linie des Lithium, während zugleich die grünen Strahlen des Barium in ihrer ganzen Stärke erschienen. Nachdem die Verbindungen des Natrium, Kalium, Lithium und Barium sich vollständig verflüchtigt hatten, vergingen einige Augenblicke, nach denen sich die Linien des Strontium und Calcium zeigten, gleich als ob ein Schleier zerrisse, und allmählich ihre Gestalt und volle Stärke annahmen.

Durch die Spectralanalyse hat man festgestellt, daß die Luft und besonders der in ihr schwebende Staub stets Natrium enthält: die Empfindlichkeit der Reaction auf dieses Metall ist so bedeutend, daß die Beobachter besondere Vorsichtsmaßregeln ergreifen müssen, damit ihre Beobachtungen nicht durch Dazwischenkunft von Staubtheilchen gestört werden. Schlägt man nur mit der Hand auf einen etwas staubigen Tisch, der sich in der Nähe befindet, so leuchtet sofort im Spectroskop die Natriumlinie auf.

Digitized by Google

Vier neue Metalle sind durch diese Methode entdeckt worden: das Caesium und Rubidium durch Bunsen und Kirchhoff, das Thallium durch Crookes und Lamp und das Indium durch Reich und Richter. Die Namen, welche man diesen Metallen gegeben hat, stehen mit den Farben der charakteristischen Linien im engen Zusammenhange, die Hauptlinie ist nämlich für das Caesium blau, für das Rubidium roth, für das Thallium grün und für das Indium indigoblau*).

Allein nicht nur für den Dienst im Laboratorium ist das Spectroskop ein ungemein wichtiges Instrument, nicht allein die chemische Analyse irdischer Körper wird durch dasselbe bis zu einem Grade der Feinheit und Genauigkeit gebracht, den man früher nicht hat ahnen können, nicht allein die Auffindung neuer Stoffe, die bis dahin vollständig unbekannt waren, hat es möglich gemacht: auch jenseits der Grenzen unserer Erde gestattet es noch die chemische Analyse, auch auf Körper, die von uns durch unendliche Räume getrennt sind, läßt es sich anwenden, und durch dieses Instrument sind uns merkwürdige Aufschlüsse geworden über die Grundstoffe, welche sich auf der Sonne, den Sternen und den entferntesten Nebelflecken vorfinden. Wie dies möglich geworden ist, wollen wir jetzt zu beschreiben versuchen.

Stellt man vor das Fernrohr eines Spectroskopes eine Gasflamme auf, welche man so klein brennen läßt, daß sie ein kaum sichtbares blaues Licht aussendet, so wird sich dieses Licht im Spectroskop gar nicht bemerklich machen, das ganze Gesichtsfeld wird dunkel erscheinen. Bringt man nun in die Flamme irgend ein Salz, so leuchtet sofort das Spectrum des Metalles auf, welches im Salze enthalten ist: nimmt man z. B. Kochsalz, so erscheint sofort die dunkle Natriumlinie. Läßt man nun durch ein zweites Rohr gleichzeitig Sonnenlicht in das Spectroskop eindringen, so daß das Spectrum der Sonne und das Spectrum des Metalles im Gesichtsfelde über einander erscheinen, so sieht man, daß die gelbe Natriumlinie genau mit der dunkeln Fraunhofer'schen Doppellinie D übereinstimmt.

Wendet man an Stelle des Sonnenlichtes das intensive Drummond'sche Kalklicht an, welches dadurch entsteht, daß ein Strom von Sauerstoff und Wasserstoff nach einem Stücke Kalk geleitet und dort entzündet wird,

*) Während des Druckes dieser Bogen ist noch ein fünftes Metall, Gallium, in gleicher Weise entdeckt worden.

Digitized by Google

wodurch der Kalk glühend wird und ein sehr starkes weißes Licht aussendet, so giebt dieses Licht ein continuirliches Spectrum, in welchem sich durchaus keine dunklen Linien zeigen. Stellt man nun zwischen dem Drummond'schen Kalklichte und dem Spectroskop einen sogenannten Bunsen'schen Brenner auf, das ist ein Gasflammenrohr, bei welchem das Gas mit matter Flamme verbrennt, aber dabei sehr große Hitze entwickelt, und. bringt man in diese Flamme ein Natriumsalz, sodaß nun das Licht des Drummond'schen Apparates durch die Natriumflamme hindurch gehen muß, ehe es in das Spectroskop gelangt, so zeigt sich plötzlich die eigenthümliche Erscheinung, daß im Spectrum des Drummond'schen Kalklichtes gerade an der Stelle, an welcher die gelbe Natriumlinie ihren Platz hat, eine dunkle Linie erscheint, welche sehr scharf begrenzt ist. Diese Erscheinung wurde von Kirchhoff entdeckt und als Umkehrung der Spectrallinien bezeichnet. Ihm und Bunsen ist es gelungen, in dieser Weise die Linien, die sich in den Spectren des Lithium, Kalium, Strontium, Calcium und Barium vorfinden, umzukehren.

Aus dieser merkwürdigen Thatsache läßt sich der Schluß ziehen, daß jeder metallische Dampf die Eigenthümlichkeit besitzt, vorwiegend Strahlen von bestimmter Färbung in größerer Menge als andere Strahlen auszusenden, daß er aber andererseits, wenn Licht durch ihn hindurch geht, aus diesem Lichte dieselben farbigen Strahlen aufsaugt und dadurch vernichtet. So sendet der Natriumdampf gelbe Strahlen von bestimmter Brechbarkeit aus, absorbirt aber auch gerade diese Strahlen aus dem Lichte, welches vom Drummond'schen Apparate ausgeht und durch ihn hindurch dringt, sodaß nun im Spectrum dieses Lichtes, welches vorher continuirlich war, an der betreffenden Stelle eine schwarze Linie erscheint.

Wenn wir nun annehmen dürfen, daß diese Absorption der Lichtstrahlen ein allgemein gültiges Gesetz ist, so folgt hieraus, daß die schwarzen Streifen des Sonnenspectrum dadurch entstanden sind, daß durch metallische Dämpfe, welche sich in der äußeren Umhüllung der Sonne vorfinden, gewisse Strahlen des Lichtes, das vom festen Sonnenkörper ausgeht, absorbirt wurden: die Sonnenatmosphäre vertritt hierbei die Stelle des Bunsen'schen Brenners, während das Drummond'sche Kalklicht durch das Licht, das der weißglühende Sonnenkörper aussendet, ersetzt wird.

Kirchhoff und Bunsen haben die Fraunhofer'schen Linien im Sonnenspectrum mit den Linien, aus welchen die Spectra vieler Metalle be-

Digitized by Google

stehen, verglichen und für viele derselben eine merkwürdige Uebereinstimmung nachgewiesen: so erscheinen an Stelle der größeren Zahl der 70 Linien, aus denen das Spectrum des Eisen besteht, im Sonnenspectrum genau entsprechend dunkle Linien, sodaß kaum ein Zweifel obwalten kann, daß sich in der Sonnenatmosphäre Eisen vorfindet. In Figur 232 kann man eine Anzahl solcher Eisenlinien auffinden, welche durch Fe bezeichnet sind, ebenso wie auch dieselbe Figur die Uebereinstimmung der Linien anderer Elemente deutlich macht. Dieselben Naturforscher haben weiter die Anwesenheit von Wasserstoff, Kupfer, Zink, Chrom, Nickel, Magnesium, Barium, Calcium und Natrium in der Sonnenatmosphäre mit Sicherheit nachgewiesen; doch auch Kobalt, Strontium und Cadmium scheint in ihr enthalten zu sein.

Daraus, daß die charakteristischen Strahlen anderer Metalle, wie des Goldes, Silbers, Platin u. s. w. im Sonnenspectrum fehlen, glaubte man früher schließen zu müssen, daß diese Körper auf der Sonne, oder wenigstens in den äußeren Schichten ihrer Atmosphäre nicht existiren. Allein dieser Schluß ist nicht berechtigt, da Mitscherlich nachgewiesen hat, daß es vorkommt, daß die Anwesenheit gewisser Stoffe in einer Flamme die Entwickelung der Spectrallinien anderer Stoffe hindert: taucht man z. B. in eine Flamme Strontiumchlorür, welches eine blaue Linie giebt, und fügt hierauf Kupferchlorür und Salmiak bei, so verschwindet sofort die blaue Linie des Strontium.

Es ist gewiß einer der größten Triumphe der Wissenschaft, daß es ihr durch diese Mittel gelungen ist, die chemische Beschaffenheit der Körper, die sich in unendlicher Ferne von uns befinden, zu erkennen: das Licht der Sonne giebt uns, nachdem es den Weg von mehr als zwanzig Millionen Meilen zurückgelegt hat, durch seine Beschaffenheit noch genauen Aufschluß, welche Elemente in einer Atmosphäre der Sonne enthalten sind, deren Existenz man früher wohl ahnte, aber nicht mit Sicherheit nachweisen konnte. Auf Fixsterne, Planeten, Kometen, Nebelflecke angewendet liefert uns die Spectralanalyse kostbares Material zur Erkenntniß der inneren Beschaffenheit dieser Körper und löst Probleme, welche selbst die stärksten optischen Instrumente wohl niemals aufklären würden. So leisten sich die verschiedenen Wissenschaften gegenseitig Hülfe und jeder Fortschritt in einer derselben ist fast jedes Mal der Ausgangspunkt für neue Entdeckungen in der anderen.

Digitized by Google

§ 4. Die wärmenden, leuchtenden und chemischen Strahlen der Sonne.

Die verschiedenen Theile des Sonnenspectrum unterscheiden sich nicht allein durch die ungleiche Brechbarkeit der Strahlen und die Abstufung ihrer Farben, auch die Lebhaftigkeit des Glanzes und die Helligkeit, mit der sie leuchten, ist eine sehr verschiedene; endlich besitzen auch die einzelnen Stellen des Spectrum eine verschiedene wärmende Kraft und wirken in verschiedener Stärke auf die chemische Verwandlung mancher Körper.

Vergleicht man die Lichtstärke der sieben Hauptfarben eines und desselben Spectrum, so sieht man sofort, daß das Gelb die größte Helligkeit besitzt: von diesem Punkte aus nimmt die Lichstärke sowohl nach der Seite des rothen, als auch nach der Seite des blauen Lichtes hin ab. Man kann die Farben des Spectrum sehr wohl in zwei Gruppen zerlegen: helle Farben, zu denen Roth, Orange, Gelb und Grün gehört, und dunkle Farben, zu welchen wir Blau, Indigo, Violet und das äußerste Roth rechnen. Läßt man das Spectrum auf eine Seite eines gedruckten Buches fallen, so kann man leicht die Worte lesen, die innerhalb des Gebiets des Orange, Gelb und Grün fallen, während das Lesen im anderen Theile schwer, im Indigo und Violet fast unmöglich ist.

Nach Fraunhofer, welcher über die Intensität der einzelnen Farben des Spectrum sehr genaue Messungen angestellt hat, ist die größte Helligkeit an der Grenze des Gelb zwischen den Linien D und E, jedoch liegt sie bedeutend näher an der Linie D, in nur ein Zehntel Entfernung vom ganzen Abstande DE. Die Messungen, die Fraunhofer anstellte, gestatteten ihm die Größe der Lichtstärke für die einzelnen Farben durch Zahlen auszudrücken, wobei er den Maximalwerth im Gelb gleich 1000 setzte: für die Lichtstärke der einzelnen Stellen des Spectrum in der Nähe der acht Hauptlinien fand er folgende Zahlenwerthe:

Linie	Farbe	Lichtstärke	Linie	Farbe	Lichtstärke
A	Dunkelroth	unmerklich	E	Grün	480
B	Roth	32	F	Blau	170
C	Roth	94	G	Indigo	31
D	Orange	640	H	Dunkelviolet	6
	Gelb	1000			

Digitized by Google

Da schon eine sehr oberflächliche Beobachtung ergiebt, daß die Lichtstärke in den einzelnen Partien eine sehr verschiedene ist, so lag die Vermuthung nahe, daß auch die Erwärmung durch die Theile des Spectrum nicht eine ganz gleichmäßige sei, und so nahm man zunächst an, daß die hellsten Strahlen auch zugleich die reichsten Wärmequellen seien. Als man nun diese Frage einer genaueren Prüfung unterzog, so zeigte sich, daß die erste Annahme allerdings richtig war, daß aber die größte Erwärmung nicht nothwendig mit dem Maximum der Erleuchtung im Gelb zusammenfallen muß, sondern genaue Untersuchungen wiesen der wärmsten Stelle des Spectrum verschiedene Lagen an. Die Abweichung dieser Resultate wurde durch Seebeck im Jahre 1828 darauf zurückgeführt, daß die Beobachter bei ihren Untersuchungen Prismen aus verschiedenen Substanzen anwendeten, welche die Wärme nicht in gleichem Grade absorbirten: und wirklich bewies der genannte Physiker daß der Punkt der größten Erwärmung in das Gelb, Orange, Roth oder Dunkelroth fiel, je nachdem er ein Prisma aus Wasser, Schwefelsäure, gewöhnlichem Glase oder englischem Flintglase anwendete. Will man daher brauchbare Resultate über die Brechung der Wärmestrahlen erzielen, so muß man ein Prisma anfertigen, das aus einem Stoffe besteht, der die Wärmestrahlen fast gar nicht absorbirt: und ein solcher Stoff ist das Steinsalz. Mittels solch eines Prisma hat nun Melloni gezeigt, daß die Erwärmung vom Violet bis zum Roth beständig zunimmt, daß dieses Wachsen aber auch noch jenseits des Roth fortdauert, und daß ein Höhepunkt erst in einer Entfernung von der äußersten Grenze des Roth erreicht wird, die ebenso groß ist, als andererseits der Abstand des Gelb von jener Grenze. Jenseits dieses Höhepunktes nimmt die Temperatur wieder ab, die Erwärmung ist aber noch merklich in einer Entfernung, welche der Länge des ganzen Spectrum gleichkommt.

Dieses merkwürdige Resultat gewinnt noch an Interesse, wenn man eine weitere Thätigkeit der Sonnenstrahlen der Beobachtung unterwirft. Daß die Sonnenstrahlen auf die Farben der Körper einen sehr großen Einfluß üben, ist allgemein bekannt: farbige Vorhänge verblassen im Sonnenlichte, ungebleichte Leinwand von gelblicher Farbe wird der Sonne ausgesetzt, damit sie weiß werde. Wie nothwendig das Licht für die ganze Entwickelung, für das Wohlbefinden und selbst für das Leben der Thiere und Pflanzen ist, das weiß jetzt Jedermann. Der Einfluß, den

Digitized by Google

das Sonnenlicht in allen diesen Fällen ausübt, besteht aber in nichts anderem, als daß es chemische Veränderungen bewirkt, daß es manche Stoffe veranlaßt, Verbindungen mit einander einzugehen, andererseits aber auch wieder manche Verbindungen löst. Mengt man im Dunkeln Chlor- und Wasserstoffgas, so üben diese beiden Körper durchaus keine Wirkung auf einander aus: setzt man die Mischung aber dem Lichte aus, so verbinden sie sich zu Chlorwasserstoff- oder Salzsäure, und zwar erfolgt diese Verbindung langsam in schwachem diffusem Tageslichte, dagegen schnell und mit starker Explosion in directem Sonnenlichte. Andere Verbindungen, z. B. die Salze des Goldes, Silbers und Platin werden dagegen durch das Licht zersetzt, und so beruht die Darstellung der Lichtbilder, welche von Niepce und Daguerre erfunden und nach dem letztgenannten als Daguerreotypie bezeichnet wurde, sowie alle Vorgänge bei der Photographie auf der chemischen Wirkung der Lichtstrahlen, mögen dieselben von der Sonne, dem Monde oder irgend einer anderen Lichtquelle von genügender Stärke ausgehen.

Ebenso wie bei den Wärmeerscheinungen entsteht auch hier die Frage, ob die chemische Kraft der Sonnenstrahlen in allen Theilen des Spectrum von gleicher Größe ist, oder ob sich auch in diesem Falle ein Maximum ergiebt. Daß das Letztere stattfindet, hat schon Scheele im Jahre 1770 erkannt, welcher zuerst die Einwirkung des Lichtes auf das Chlorsilber wahrnahm und zugleich bemerkte, daß die verschiedenen Farben des Spectrum in ungleicher Weise auf die Zersetzung jenes Stoffes wirken. Spätere Untersuchungen ergaben, daß die chemische Wirkung vom Roth bis zum Violet beständig zunimmt, sodaß sich im letzteren Theile des Spectrum das Chlorsilber schon binnen weniger Minuten schwärzt, während dazu im rothen und grünen Theile Stunden erforderlich sind, und daß die chemische Wirkung des Lichtes noch weit über die Grenzen des sichtbaren Spectrum jenseits des violetten Theiles hinaus reicht. Für jeden Stoff nimmt also vom Roth an gerechnet die chemische Wirkung des Lichtes zu, erreicht ungefähr in der Nähe der violetten Strahlen einen größten Werth, von welchem an sie wieder beständig abnimmt: die Lage dieses Maximum ist aber nicht für alle Stoffe dieselbe, sie ist eine andere, wenn es sich um Zersetzung von Silbersalzen, als wenn es sich um Zersetzung von Gold- oder Kalisalzen handelt.

Auch dieses chemische Spectrum, wie man es zum Unterschiede von

Digitized by Google

dem Wärme- und Lichtspectrum nennen kann, zeigt Linien, die den Fraunhofer'schen Linien entsprechen. Läßt man das Spectrum auf einen Papierstreifen fallen, welcher mit einer Lösung von Chlorsilber getränkt ist, so wird derselbe, soweit das sichtbare Spectrum reicht und auch noch jenseits des Violet geschwärzt: in diesem dunklen Theile erscheinen aber weiße Linien, welche der Lage nach genau den Fraunhofer'schen Linien entsprechen und ebenfalls ein Beweis sind, daß dem Sonnenlichte Strahlen von gewisser Brechbarkeit fehlen. Auch in dem Theile jenseits des Violet zeigen sich ähnliche Streifen, welche natürlich im gewöhnlichen Lichtspectrum nicht wahrgenommen werden können. Zerlegt man das Licht durch ein Prisma aus Bergkrystall, so werden auch noch jenseits des violetten

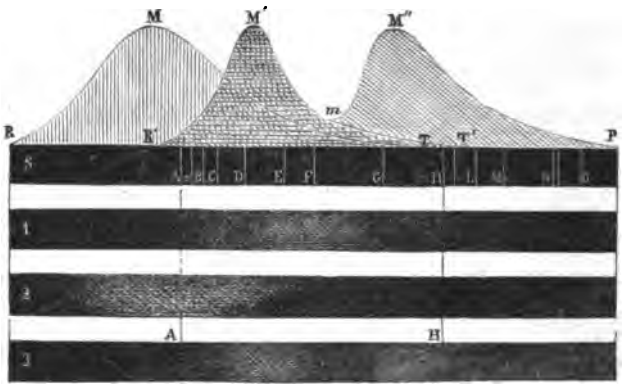


Fig. 234. Licht-, Wärme- und chemisches Spectrum der Sonnenstrahlen; 1. Lichtspectrum, R'M'T'; 2. Wärmespectrum, RMT; 3. Chemisches Spectrum, R'mM''P.

Lichtes Strahlen sichtbar, die sogenannten ultravioletten Strahlen, welche von lavendelblauer Farbe sind und zuerst von J. Herschel wahrgenommen wurden. Die Fraunhofer'schen Linien in denselben fand zuerst Becquerel, später auch Mathiessen, Helmholtz und Esselbach, und es zeigte sich, daß auch diese Linien mit den im chemischen Spectrum beobachteten, übereinstimmen.

Das Spectrum der Sonne ist also vollständiger, als es zuerst scheint, wenn man sich auf die Erscheinungen beschränkt, die wir durch unseren Gesichtssinn allein wahrnehmen können: es scheint aus drei übereinanderliegenden Spectren zu bestehen, von denen das erste Licht und Farben giebt, (Fig. 234, 1), das zweite uns über die Wärmewirkungen der Sonnenstrahlen aufklärt (Fig. 234, 2) und das dritte die chemische

Digitized by Google

Thätigkeit derſelben anzeigt (Fig. 234, 3). Sind es denn aber wirklich verſchiedene Strahlen, welche dieſe drei Arten von Wirkungen hervorbringen? Schon wegen der Uebereinſtimmung der Fraunhofer'ſchen Linien ſind wir genöthigt, dieſe Frage zu verneinen: es iſt in der That ein und derſelbe Strahl, welcher uns als farbiges Licht erſcheint, welcher am Thermometer eine höhere Temperatur anzeigt und welcher das Chlorſilber ſchwärzt; doch auch hier zeigt es ſich, wie ſo häufig in der Natur, daß, wenn ſich eine Wirkung ſteigert, eine andere an Intenſität verliert: die chemiſch wirkſamſten Strahlen wärmen und leuchten nicht und die heißeſten Strahlen wirken weder auf unſer Auge, noch auf das photographiſche Papier.

§ 5. Erſcheinungen der Phosphoreſcenz.

Im Jahre 1677 fand ein Hamburger Alchimiſt Namens Brandt einen neuen Körper durch ein Verfahren, welches er Anfangs geheim hielt und bemerkte an demſelben außer manchen anderen Eigenthümlichkeiten die Eigenſchaft, daß er an der Luft beſtändig einen leichten Rauch ausſendete, welcher im Dunkeln mit ſchwachem Lichte leuchtet; wegen dieſes Leuchtens bezeichnete Brandt dieſen Körper mit dem Namen Phosphor, d. h. Lichtträger. Wenige Jahre nach Brandt fand auch Kunkel das Mittel, Phosphor darzuſtellen; und faſt hundert Jahre ſpäter zeigte Scheele im Jahre 1769, daß dieſer Stoff, den wir jetzt unter die chemiſchen Elemente rechnen, in den Knochen des Menſchen und der Thiere in großer Menge enthalten iſt. Schreibt man mit einem Stäbchen aus Phosphor irgend welche Schriftzüge auf eine Mauer, ſo erſcheinen dieſelben in der Dunkelheit wie eine leuchtende Schrift, die nicht eher verſchwindet, als bis der Phosphor theils durch langſame Verbrennung, theils durch Verdampfung ſich vollſtändig verflüchtigt hat.

Vor der Entdeckung dieſes Stoffes bezeichnete man mit demſelben Namen jeden Körper, welcher ſo wie jener Licht ausſendet ohne merklich warm zu ſein: es zeigen aber dieſe Eigenſchaft Hölzer, welche anfangen ſich durch Feuchtigkeit zu zerſetzen, todte Meeresfiſche, die noch nicht vollſtändig in Fäulniß übergegangen ſind und ihr Licht ſogar manchmal dem Meerwaſſer mittheilen, und endlich eine große Zahl mineraliſcher Subſtanzen, beſonders wenn dieſelben geſtoßen, geſchlagen oder gerieben

Digitized by Google

werden, oder auch wenn sie eine Zeitlang den Sonnenstrahlen ausgesetzt waren. Diese freiwillige oder künstliche Lichtaussendung bezeichnet man als Phosphorescenz.

Dieselbe Erscheinung findet man auch im Reiche der lebendigen Natur, und Jeder kennt ja die Johanniswürmchen, welche an schönen Sommerabenden durch die Luft fliegen und dabei ihr prachtvolles grünes Licht leuchten lassen; und ebenso bekannt ist es auch, daß nicht blos das vollendete Insect diesen Glanz besitzt, sondern daß auch seine Made, welche sich gern im feuchten Grase aufhält, ein ähnliches Licht aussendet. Die Laternenträger in Guyana und die Cucujos in Mexiko und Brasilien senden während der Nacht ein so starkes Licht aus, daß, wenn man mehrere derselben in eine Flasche sperrt, man beim Scheine ihrer Leuchtorgane lesen kann. Auch das Leuchten des Meeres wird durch Myriaden kleiner Thiere bewirkt, welche durch ähnliche Leuchtorgane, wie sie die Leuchtkäfer besitzen, ein ziemlich lebhaftes Licht aussenden, sodaß die Wogen, in denen sie sich bewegen, weithin sichtbar werden. Es sind theils Infusionsthierchen, theils Quallen und Seesterne, welche diese bald blauen, bald rothen oder grünen Strahlen aussenden und dadurch die glänzende Erscheinung veranlassen, von der Ehrenberg sagt: „Das Funkensprühen beim Schmieden des Eisens, das Brillantfeuer unserer Feuerwerke, womit Seefahrer häufig die Erscheinung vergleichen, geben ähnliche Eindrücke ins Auge; aber was sind diese momentanen Funken gegen das Feuerwerk der Meere, dessen Erscheinung einen um so tieferen Eindruck macht, je ausdauernder sie ist, und je mehr man sich allmählich überzeugt, daß jeder der Millionen in jeder Secunde wechselnden Lichtpunkte die Willkür und Freiheit eines besonderen organischen Wesens bezeichnet!“

Auch gebrannte Austernschalen fangen an zu leuchten, wenn sie zuvor eine Zeit lang der Sonne ausgesetzt waren: sie verdanken diese Eigenthümlichkeit ihrem Gehalte an Schwefelcalcium, welches dieselbe ebenso besitzt, wie das Schwefelbarium und Schwefelstrontium. Weiter kann sich die Phosphorescenz bei einer großen Zahl von Stoffen durch mechanische oder chemische Thätigkeit entwickeln, und wer hätte z. B. noch nicht das Leuchten des Zuckers gesehen, wenn derselbe zerbrochen wird? Aehnliche Erscheinungen zeigen sich auch dann, wenn man zwei Stücke Quarz, Kreide, oder Chlorkalk gegen einander reibt, oder wenn man die Blättchen des Glimmers von einander spaltet. Auch durch Temperatur-

Digitized by Google

erhöhung kann dieses Leuchten bewirkt werden: und so entwickeln Flußspath, Diamant und andere Edelsteine, Kreide, schwefelsaures Kali und schwefelsaures Chinin Licht, wenn wir sie mit heißen Körpern in Berührung bringen. Daß auch endlich die Elektricität bei schlechten Leitern dieselbe Wirkung hervorbringt, werden wir später sehen.

Wir haben somit eine ganze Reihe von Erscheinungen, bei welchen die Erzeugung des Lichtes weder die Folge einer Verbrennung bei hoher Temperatur, noch die Wirkung einer Bestrahlung ist, denn in letzterem Falle müßte das Leuchten sofort aufhören, sobald die Lichtquelle entfernt würde. Alle Körper aber, welche wir als solche aufgezählt haben, die unter gewissen Bedingungen phosphoresciren, erhalten für eine bestimmte Zeit, die manchmal ziemlich ausgedehnt ist, die Fähigkeit, eigenes Licht in die Dunkelheit auszusenden, das intensiv genug ist, um benachbarte Gegenstände zu erhellen.

Die Phosphorescenz scheint durch verschiedene Ursachen bewirkt zu werden: wodurch sie zunächst in lebenden Organismen hervorgerufen wird, das ist so gut wie noch nicht ermittelt; nur soviel weiß man, daß das Leuchten zum Theil in die Willkür des Thieres gestellt ist, und daß weiter zur Entwickelung des Lichtes eine mäßige Temperatur und Anwesenheit des Sauerstoffes erforderlich ist: zu starke Kälte oder große Hitze verlöschen gleicherweise das Licht. Beim Phosphor selbst, wie auch bei faulenden organischen Substanzen ist das Licht höchst wahrscheinlich die Folge einer chemischen Thätigkeit, einer langsamen Verbrennung: unter der Luftpumpe verschwindet bei diesen Stoffen jede Phosphorescenz. Ueber die Lichterscheinungen endlich, welche durch Wärme, Elektricität, mechanische Thätigkeit oder Bestrahlung durch die Sonne hervorgerufen werden, haben die Untersuchungen von Biot, Matteucci und besonders Becquerel einige Klarheit gebracht, und wir wollen jetzt die gefundenen Erklärungen kurz wiederholen.

Vor allen Dingen hat man gefunden, daß es eine sehr große Zahl von festen und luftförmigen Körpern giebt, welche, wenigstens für kurze Zeit, phosphorescent werden: so das Papier, der Bernstein, die Seide und andere Stoffe organischen Ursprungs; die Oxyde und Salze der Alkali- und Erdmetalle, sowie des Uran; und endlich eine Menge Gase. Bei anderen Metallen und deren Verbindungen und bei allen Flüssigkeiten hat man bis jetzt Phosphorescenz noch nicht auffinden können.

Digitized by Google

Die Beschaffenheit des phosphorescirenden Lichtes ist nach der Natur der Körper verschieden: die Edelsteine senden vorwiegend gelbes oder blaues Licht aus, während sich im Lichte der Schwefelverbindungen des Strontium, Barium und Calcium alle Spectralfarben vom Roth bis zum Violet vorfinden. Eine der merkwürdigsten Beobachtungen, die Becquerel gemacht hat, besteht darin, daß Farbe und Helligkeit des Lichtes nicht nur von der Temperatur abhängen, sondern auch von der Art, wie die Schwefelverbindungen dargestellt wurden, ja sogar von der molecularen Beschaffenheit der Salze, aus denen man sie darstellte. Indem er verschiedene Sorten kohlensauren Kalkes, als Spath, Kreide, Marmor, u. s. w. mit Schwefel behandelte, erhielt er sechs Arten von Schwefelcalcium, welche, der Sonne ausgesetzt, phosphorescent wurden und im Dunkeln folgende Farbennüancen zeigten:

Schwefelcalcium, dargestellt aus	dichtem Kalk	Orangegelb
	Kreide	Gelb
	Kalkspath	Grün
	faserigem Aragonit	Grün
	Marmor	Violet
	dichtem Aragonit	Violet

„Wenn ich mir einen Vergleich erlauben darf," sagt Becquerel bei dieser Gelegenheit, „so möchte ich sagen, daß sich diese letzteren Körper in Bezug auf die Lichteffecte ähnlich verhalten, wie Saiten, durch welche man nach dem Grade ihrer Spannung verschiedene Töne hervorbringen kann."

Erhöhung der Temperatur beschleunigt die Phosphorescenz, aber bewirkt zugleich, daß die Erscheinung schneller vorübergeht und wieder verschwindet. Auch die Farbennüance wird durch die Temperatur wesentlich verändert: so durchläuft die Farbe des phosphorescirenden Lichtes des Schwefelstrontium verschiedene Abstufungen zwischen Dunkelblau, Hellblau, Grün, Gelb und Orange, während sich die Temperatur von — 20° bis auf + 150° erhöht. Ein großes Interesse gewährt es zu untersuchen, in welchem Grade die verschiedenen Strahlen des Spectrum, von den äußersten chemischen jenseits des Violet, bis zu den äußersten Wärmestrahlen jenseits des Roth, die Phosphorescenz hervorrufen: man hat zu diesem Zwecke das Spectrum auf Bändern aufgefangen, welche mit verschiedenen phosphorescirenden Substanzen bedeckt waren, und dann nach Abblendung des Spectrum untersucht, welche Theile das stärkste Licht

Digitized by Google

ausſtießen. Auch hier hat man gefunden, daß die Lage des Maximum für die einzelnen Subſtanzen, welche man der Prüfung unterzog, eine verſchiedene iſt, daß es aber immer in die Nähe der äußerſten violetten oder der ſtärkſten chemiſchen Strahlen fällt: die Wärmeſtrahlen ſind nicht im Stande, Phosphoreſcenz zu erregen, wohl aber können ſie das Leuchten noch längere Zeit unterhalten, wenn daſſelbe durch chemiſche Strahlen hervorgerufen war. Dieſe Erſcheinungen geben eine einfache Erklärung dafür, daß das Licht der Kerzen, gewöhnlicher Lampen und Gasflammen

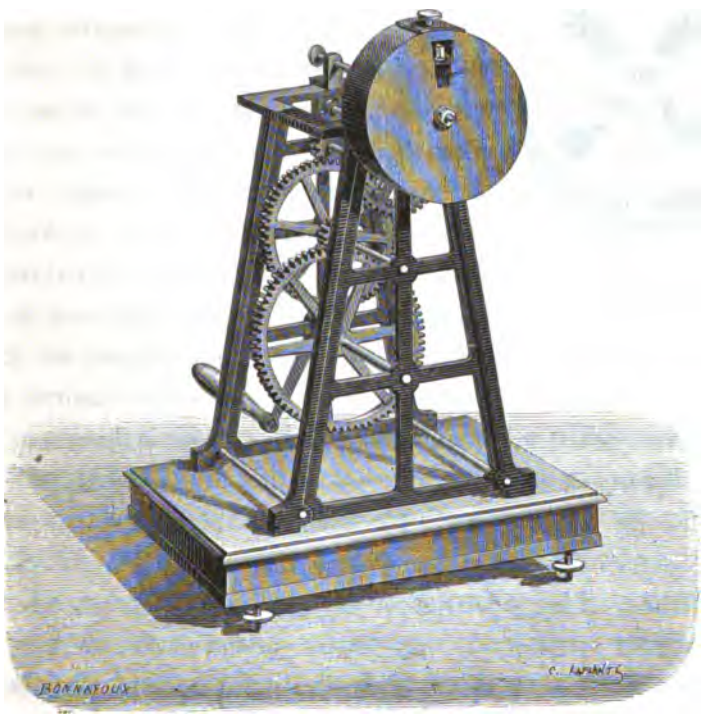


Fig. 235. Phosphoroſkop nach Becquerel.

ſo wenig geeignet iſt, Phosphoreſcenz zu bewirken, während das elektriſche Licht dieſelbe ſehr ſtark erregt: denn während jene Lichtquellen an chemiſchen Strahlen ziemlich arm ſind, beſitzt das letztere dieſelben in überreicher Fülle. In ähnlicher Weiſe wirkt auch das Magneſiumlicht, und es genügt, einen Magneſiumdraht vor einer Röhre, die mit Schwefelcalcium gefüllt iſt, zu entzünden, um zu bewirken, daß dieſelbe im Dunkeln lange Zeit fortleuchtet.

Um die Dauer der Phosphoreſcenz für einzelne Körper zu unter-

Digitized by Google

ſuchen, hat Becquerel einen Apparat conſtruirt, den er mit dem Namen eines Phosphoroſkopes bezeichnet, und der in Fig. 235 dargeſtellt iſt. An einer gemeinſamen Axe befinden ſich zwei ſchwarze Scheiben, deren jede vier Einſchnitte hat, welche gleichen Abſtand von einander beſitzen. Die Stellung beider Scheiben iſt eine ſolche, daß die Einſchnitte nicht einander gegenüberſtehen, ſondern mit einander abwechſeln, ſodaß niemals ein Lichtſtrahl quer durch beide hindurchgehen kann, wie ſchnell die Scheiben auch rotiren mögen (Fig. 236). Dieſe beiden Scheiben drehen ſich in einem geſchloſſenen Kaſten, in deſſen Wänden ſich zwei einander gegenüberſtehende Spalten befinden: durch den einen Spalt fällt das Sonnenlicht auf den Körper, deſſen Phosphoreſcenz beobachtet werden ſoll und der ſich im Innern des Kaſtens zwiſchen den beiden Scheiben befindet, ſo oft eine Oeffnung der einen Scheibe den Durchgang des Lichtes geſtattet; durch den anderen Spalt aber beobachtet man das Phosphoreſciren des Körpers. Wegen der Stellung der Scheiben kann letztere Beobachtung immer nur einige Zeit ſpäter angeſtellt werden, nachdem der Zutritt des Sonnenlichtes bereits wieder verhindert iſt; durch ſchnelle Umdrehung läßt ſich dieſe Zwiſchenzeit beliebig verkürzen. Man wird alſo für jeden Körper, der überhaupt phosphoreſcirt, eine Umdrehungsgeſchwindigkeit erreichen können, bei welcher der Einfluß des Sonnenlichtes ſo lange fortdauert, bis eine neue Oeffnung der Scheibe vor den Spalt getreten iſt. Bei dieſer Geſchwindigkeit wird alſo der Gegenſtand beſtändig leuchtend erſcheinen, und umgekehrt kann man aus der Umdrehungsgeſchwindigkeit, bei welcher dieſe Erſcheinung zuerſt eintritt, die Dauer des Phosphoreſcirens der Körper berechnen. Steigert man die Geſchwindigkeit noch weiter, ſo wird die Zeit, während welcher das Sonnenlicht auf den Körper wirkt, immer kürzer, und dadurch die Intenſität der Phosphoreſcenz wieder geringer, ſodaß es für jeden Körper eine Geſchwindigkeit geben muß, bei welcher ſein Licht die größte Stärke beſitzt.

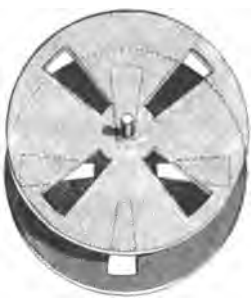


Fig. 236. Scheiben des Phosphoroſkopes.

Mit Hülfe des Phosphoroſkopes hat Becquerel gezeigt, daß Körper phosphoreſciren, bei denen dieſe Erſcheinung nicht länger, als den zehntauſendſten Theil einer Sekunde andauert. Welcher Unterſchied gegen

Digitized by Google

die Körper, welche die Erscheinung am besten zeigen: so leuchtet der Diamant im Dunkeln noch mehrere Stunden fort, beim Schwefelstrontium und Schwefelcalcium aber hat man sogar die Erscheinung sechsunddreißig Stunden lang beobachtet.

Das Licht, welches verschiedene Pflanzenstoffe und Thiere aussenden, hat man der Spectralanalyse unterworfen und hat continuirliche Spectra gefunden, in denen weder dunkle Streifen, noch besonders vortretende Linien wahrgenommen werden konnten.

§ 6. Das Wesen des Lichtes.

Bis hierher haben wir uns darauf beschränkt, die Lichterscheinungen so, wie wir sie direct beobachten können, zu beschreiben, ohne uns auf irgend eine Hypothese über die eigentliche innere Natur der Kraft einzulassen, welche in unseren Sinneswerkzeugen die Wahrnehmung jener Erscheinungen hervorruft. Alles was wir darüber in Erfahrung gebracht haben, besteht darin, daß die verschiedenen Körper in zwei Classen getheilt werden können: in die erste gehören die Lichtquellen, d. h. diejenigen Körper, welche direct aus sich selbst Licht aussenden; in die zweite dagegen diejenigen, welche zwar das von den Quellen ausgehende Licht in verschiedener Weise uns übermitteln, ohne jedoch in ihrem augenblicklichen Zustande aus sich selbst neue Lichtstrahlen aussenden zu können.

Unter den Lichtquellen giebt es solche, die, wie die Sonne und die meisten Fixsterne, scheinbar immer in gleicher Stärke fließen, oder deren strahlende Kraft sich wenigstens seit tausenden von Jahren nicht verringert hat: wollte man die wahrscheinliche Dauer dieser Kraft schätzen, so würde man Zeiträume bekommen, die unser Fassungsvermögen weit übersteigen. Gleichwohl ist gar kein Zweifel, daß sich auch diese Lichtquellen gar nicht wesentlich von denjenigen unterscheiden, welche uns an der Oberfläche der Erde zu Gebote stehen: die letzteren aber verdanken ihren Zustand entweder einer sehr hohen Temperatur, welche chemische Vorgänge herbeiführt, die geeignet sind Licht zu entbinden, oder einem elektrischen Ausgleiche, der ähnliche Erscheinungen herbeiführt. Alles was man über die physische Beschaffenheit der Sonne weiß, deutet darauf hin, daß sich dieser Körper im weißglühenden Zustande befindet, daß seine Temperatur eine enorme Höhe hat, daß aber die Erzeugung von Wärme und Licht nur

Digitized by Google

dadurch entsteht, daß Kräfte anderer Art in entsprechender Menge aufgebraucht werden.

Wir haben weiter gesehen, daß das Licht sich nicht augenblicklich ausbreitet, sondern daß immer eine gewisse Zeit erforderlich ist, damit es von einem Punkte zu einem anderen gelange, woraus man wohl den Schluß ziehen darf, daß es selbst eine Bewegungserscheinung ist; und es fragt sich nur noch, ob diese Bewegung darin besteht, daß ein gewisser Stoff vom leuchtenden Körper aus nach allen Richtungen hin geschleudert wird, oder ob von ihm Erschütterungen ausgehen, die sich von Theilchen zu Theilchen weiter im Raume übertragen. Die Untersuchung dieser höchst wichtigen Frage hat zu einer Theorie geführt, die jetzt allgemein von allen Physikern angenommen wird, und deren weitere Entwickelung zu den schönsten Entdeckungen im Gebiete der Optik geführt hat: eine Theorie, welche alle Erscheinungen aus der Lehre vom Lichte auf ein gemeinsames Princip zurückführt, und dadurch die Aufgabe, alle Kräfte der Natur unter einem Gesichtspunkt zusammenzufassen, wesentlich gefördert hat*). Bevor wir uns jedoch zur Auseinandersetzung dieser Theorie wenden, ist es nothwendig, die ältere Theorie, die noch in Newton einen Hauptvertreter fand und durch ihn besonders ausgearbeitet wurde, kurz zu besprechen.

Nach der älteren Ansicht, welche man mit dem Namen der Emissionstheorie bezeichnet, besteht das Licht aus materiellen Molecülen von außerordentlicher Feinheit, welche von den Lichtquellen in jedem Augenblicke ausgesendet werden und welche alle mit gleicher Geschwindigkeit den Raum durchfliegen: treffen diese Körperchen auf die Netzhaut, so erschüttern sie die Sehnerven und verursachen die Lichtempfindung. Auf diese Theilchen übt die Materie sowohl anziehende, als auch abstoßende Kräfte aus, und erstere bewirken die Refraction, letztere die Reflexion des Lichtes. Es giebt so viele verschiedene Arten solcher Theilchen, als sich Farben unterscheiden lassen, deren jede in verschiedenem Grade beim Uebergange aus einem Mittel in ein anderes gebrochen wird.

Alle die Theilchen, welche in denselben Graden einander nachfolgen, bilden einen Lichtstrahl. Dieselben können durch sehr bedeutende Zwischen-

*) Vgl. Secchi, Die Einheit der Naturkräfte, Deutsch vom Verfasser. Leipzig, Paul Frohberg, 1875.

Digitized by Google

räume von einander getrennt sein: denn, da der Lichteindruck in unserem Auge ungefähr $^1/_{10}$ Secunde andauert, so würde es genügen, wenn immer nur nach Verlauf dieses Zeitraumes ein neues Theilchen dem vorhergehenden folgte, um den Eindruck continuirlichen Lichtes hervorzubringen. Wenn aber in einer Secunde nur zehn Theilchen in derselben Richtung sich bewegen, so beträgt der Zwischenraum zwischen je zwei auf einander folgenden 31000^{km}, gingen dagegen hundert Lichttheilchen in der Secunde von der Lichtquelle aus, so würden sie immer noch einen Abstand von 3100^{km}, von einander haben. Hieraus würde es erklärlich sein, daß sich die Strahlen, die von verschiedenen Punkten ausgehen, durchkreuzen können, ohne sich in ihren Bahnen irgendwie zu stören. Fragt man dagegen, wie groß die Masse eines solchen Theilchen sein kann, da es doch trotz seiner enormen Geschwindigkeit durchaus keinen mechanischen Effect hervorbringt, so findet sich ein Werth, von dem wir uns eine Vorstellung nicht machen können. J. Herschel sagt über diesen Punkt: „Besäße ein Lichtmolecül das Gewicht eines Granes (0,065 gr.), so würde es doch dieselbe Wirkung hervorbringen, wie eine Kanonenkugel von mehr als 150 Pfund (68 Kilogramm), welche in der Secunde 1000′ durchläuft. Wie fein müßten daher diese Lichttheilchen sein, da Myriaden derselben, wenn sie auf Linsen oder Spiegel treffen, den empfindlichsten Apparaten, die eigens zu diesem Zwecke construirt wurden, auch nicht die geringste Bewegung ertheilen!“

Die Erscheinungen der Refraction erklärte Newton, wie wir bereits erwähnten, dadurch, daß die Lichtmolecüle von den brechenden Substanzen angezogen würden. Nehmen wir nun an, daß diese Anziehung nur auf sehr kleine Entfernung hin wirkt, und berechnen wir die anziehende Kraft für den Fall, daß das Lichttheilchen von seinem Wege um 30° abgelenkt wird, so ergiebt sich, daß dazu eine Kraft erforderlich sein würde, welche nicht weniger als zweitausend Septillionen mal so groß wäre, als die Kraft, womit die Erde dasselbe Theilchen anzieht. Dieses Resultat ist, in Anbetracht der vorher erwähnten außerordentlichen Kleinheit der Theilchen, nicht geeignet, der Emissionstheorie einen großen Grad von Wahrscheinlichkeit zu verschaffen; und schon diese Gründe würden die erwähnte Theorie unhaltbar machen, auch wenn nicht directe Beweise, die wir bald besprechen werden, uns zwängen, dieselbe aufzugeben: nicht die Größe der Zahlen ist es in diesem Falle, welche gegen die Theorie spricht,

Digitized by Google

denn auch die andere Theorie führt auf Werthe, die sich unserer Anschauung nur schwer anbequemen, sondern der Widerspruch, daß sich eine so enorme Kraft bei unendlicher Kleinheit der Masse entwickeln soll.

Dieser Ansicht gegenüber steht nun die sogenannte Undulationstheorie, welche schon vor Newton's Zeit in Huyghens einen Hauptvertreter fand, später aber durch Hooke und Euler, und in unserem Jahrhundert durch Young, Fresnel und viele andere weiter entwickelt und durch neue Beweise über allen Zweifel gestellt wurde. Wir wollen versuchen, auch diese Theorie in ihren Grnndzügen dem Leser vorzuführen.

Während die Emissionstheorie voraussetzt, daß der Raum außerhalb der Erdatmosphäre von Stoff vollständig frei sei, damit sich die Lichtmolecüle in ihm ganz unbehindert bewegen können, so nimmt man in der Undulationstheorie dagegen an, daß diesen Raum eine außerordentlich feine, der Schwerkraft nicht unterworfene, elastische Materie erfülle, welche außerdem auch noch alle Körper durchdringt und die Zwischenräume zwischen den Molecülen erfüllt. Diese Materie bezeichnet man mit dem Namen des Aethers. Unter leuchtenden Körpern versteht man nun solche Körper, deren Molecüle sich in einer schwingenden Bewegung befinden, welche sich auf den Aether überträgt und in demselben von Theilchen zu Theilchen mit der gleichmäßigen Geschwindigkeit von 310000 Kilometern in der Secunde nach allen Richtungen hin weiter schreitet. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Lichtwellen ist für alle Farben und Intensitäten in einem und demselben Mittel dieselbe: geht aber das Licht aus einem Mittel in ein anderes über, so ändert sich diese Geschwindigkeit, woraus man schließen kann, daß die Elasticität und Dichtigkeit des Aethers in durchsichtigen Körpern nicht dieselbe ist, wie im leeren Weltraume, sondern von einem Mittel zum anderen verschiedene Werthe annimmt, sowie, daß der Aether in seiner Beweglichkeit durch die wägbare Materie sehr beeinflußt wird.

Die Vorgänge bei der Strahlung des Lichtes hat man sich nun so zu denken, daß jedes Molecül an der Oberfläche der Lichtquelle mit ungeheurer Schnelligkeit vibrirt, d. h. daß es gleichmäßig hin- und hergehende Schwingungen um eine Mittellage ausführt: diese Schwingungen theilen sich den Aethermolecülen mit, welche in eine ähnliche Bewegung gerathen, und diese Vorgänge verbreiten sich im Raume um den leuchtenden Punkt in der Weise, daß immer alle Punkte, die auf einer Kugelfläche liegen,

Digitized by Google

deren Mittelpunkt der leuchtende Punkt ist, gleichzeitig ihre Schwingungen vollbringen. Während nun ein Molecül seine volle Schwingung einmal durchläuft, theilt sich seine Bewegung in der Richtung, in der sich der Strahl fortpflanzt, einer Reihe anderer Aethertheilchen mit, deren letztes vom Ausgangspunkte einen bestimmten Abstand hat: diese Entfernung heißt die Wellenlänge; unter einer Lichtwelle versteht man also die Reihe von Bewegungen, welche in jener Linie während der Dauer einer vollen Schwingung eines Aethermolecüles ausgeführt werden. Da sich das Licht im Raume nach allen Seiten hin mit gleicher Geschwindigkeit fortpflanzt, so werden alle Punkte, die vom leuchtenden Punkte gleichen Abstand haben, sich immer in derselben Schwingungsphase befinden: man bezeichnet daher diese Kugelflächen als Wellenoberflächen: in manchen Mitteln, welche nicht nach allen Richtungen hin einen gleichen Grad von Elasticität besitzen, sind an Stelle der kugelförmigen Wellenoberflächen ellipsoidische zu setzen.

Die Lichtwellen haben also mit den Schallwellen eine sehr große Aehnlichkeit: wie diese werden sie in gleicher Zeit ausgeführt, sind isochron, bewegen sie sich mit gleicher Geschwindigkeit, bestehen sie in schwingenden Bewegungen des Mittels um eine Gleichgewichtslage. Allein während die gewöhnliche greifbare und wägbare Materie der Träger der Schallschwingungen ist, werden die Lichtschwingungen durch einen Stoff ausgebreitet, der sich unserer directen Beobachtung entzieht, der vor allem der Schwerkraft nicht unterworfen ist, weil er selbst, wie Secchi sagt, vielleicht Ursache der Schwerkraft ist; und während die Schallwelle in der Luft in der Secunde einen Weg von 331^{m} durchläuft, legt das Licht in derselben Zeit 310000000^{m} zurück; endlich, während die Wellenlänge der Töne, die unserem Ohre wahrnehmbar sind, zwischen 10^{mm} und 20^{m} liegt, erreicht die längste Lichtwelle, die auf unser Auge wirkt, noch nicht den tausendsten Theil eines Millimeters. Der wichtigste Unterschied zwischen beiden Arten von Wellen besteht aber darin, daß, wie Fresnel gezeigt hat, die Schwingungen der Aethertheilchen in einer Richtung erfolgt, welche senkrecht zu der Richtung ist, in welcher sich der Lichtstrahl fortpflanzt, also parallel der Wellenoberfläche, während die Schallschwingungen der Luft in der Ausbreitungsrichtung selbst erfolgen: das Licht schwingt transversal, der Schall longitudinal. Um sich von der Art, wie das Licht schwingt, eine klare Vorstellung zu machen, spanne

Digitized by Google

man eine ſtarke Leine horizontal ziemlich ſtraff aus: ertheilt man nun derſelben von oben her an dem einen Ende einen verticalen Schlag, ſo führt nicht nur das getroffene Theilchen ſchwingende Bewegungen aus, welche auf der Richtung der Leine ſenkrecht ſind, ſondern dieſe Oſcillationen pflanzen ſich der Länge nach durch die ganze Leine fort, ſodaß jedes Stück der Reihe nach ſolche Bewegungen ausführt, die zu der Fortpflanzungsrichtung ſenkrecht ſind. In gleicher Weiſe ſchwingen auch die Theilchen einer Waſſeroberfläche ſenkrecht zu der Richtung, in der ſich die Bewegung ausbreitet, die dadurch entſteht, daß man einen Stein in das Waſſer wirft, und auch hier, wie bei den Schwingungen des Seiles, und wie bei den Schwingungen des Lichtes, erfolgt die Bewegung, ohne daß die Molecüle ſelbſt in der Richtung, in welcher ſich die Wellen ausbreiten, weiter rücken.

Wir werden bald Mittel kennen lernen, durch welche man die Länge der Lichtwellen meſſen kann: jetzt wollen wir vorläufig die gefundenen Werthe, die freilich außerordentlich klein ſind, mittheilen. Kennt man aber die Wellenlänge, ſo findet man auch mit größter Leichtigkeit die Zahl der Schwingungen, welche das Licht von einer beſtimmten Farbe in einer Secunde ausführt: denn, da man weiß, daß jeder Strahl in einer Secunde den Weg von 310000 Kilometer zurücklegt, ſo braucht man nur zu berechnen, wie oft die gefundene Wellenlänge in dieſer Zahl enthalten iſt, um die Schwingungszahl zu beſtimmen. Für die einzelnen Hauptfarben hat man aber folgende Reſultate gefunden:

	Wellenlänge in Millionſteln eines Millimeters:	Zahl der Schwingungen in einer Secunde:
Roth	620	500 Billionen
Orange	583	532 „
Gelb	551	563 „
Grün	512	605 „
Blau	475	653 „
Indigo	449	690 „
Violet	423	733 „

Dies ſind in ihren Grundzügen die beiden Theorien, durch welche man die Lichterſcheinungen zu erklären verſuchte: und in der That läßt ſich auch ſowohl Reflexion, als auch Refraction, aus der einen ſo leicht, als aus der anderen ableiten; allein, während nach der Emiſſionstheorie die Fortpflanzungsgeſchwindigkeit im ſtärker brechenden Mittel größer

Digitized by Google

sein muß, als im leeren Raume oder im schwächer brechenden Mittel, folgt aus der Undulationstheorie, daß sich der Lichtstrahl um so langsamer bewegen muß, je größer die brechende Kraft des Mittels ist. Wollte man daher entscheiden, welche Theorie die richtige ist, so kam es darauf an, zu untersuchen, ob sich das Licht in irgend einem anderen Mittel, z. B. im Wasser, schneller oder langsamer fortpflanzt, als in der Luft. Diese Frage ist nun durch Versuche, welche Foucault ausführte, endgiltig entschieden worden: durch sehr feine Apparate verglich dieser Physiker die Geschwindigkeit des Lichtes mit der Geschwindigkeit eines Spiegels, welcher sehr schnell rotirte, und zeigte mit unzweifelhafter Klarheit, daß das Licht eine Verzögerung erlitt, wenn es durch eine mit Wasser gefüllte Röhre hindurchging. Die Frage war also hierdurch zu Gunsten der Undulationstheorie entschieden. Doch noch eine Reihe anderer Erscheinungen, zu deren Besprechung wir jetzt übergehen, und die in der Emissionstheorie durchaus keine Erklärung finden können, bestätigen diese Ansicht, sodaß jetzt gar kein Zweifel mehr darüber obwaltet, daß das Licht in einer schwingenden Bewegung besteht, deren Träger ein Stoff ist, der sowohl den Weltenraum, als auch die Zwischenräume zwischen den Molecülen der Körper erfüllt.

Viertes Kapitel.

Interferenz der Lichtwellen. Diffraction der Lichtstrahlen.

§ 1. Interferenz der Lichtwellen.

In einem merkwürdigen Buche, welches Pater Grimaldi zu Bologna im Jahre 1665 unter dem Titel Physico-mathesis de lumine veröffentlichte, findet sich zuerst eine Erscheinung erwähnt, die er mit einem Namen bezeichnete, der noch jetzt in der Physik allgemein angewendet wird, nämlich die Erscheinung der Diffraction oder Beugung des Lichtes, welche Grimaldi zuerst bei folgendem Versuche beobachtete. In den Weg eines Strahlenbündels, welches durch einen engen Spalt in ein dunkles Zimmer eintrat, wurden sehr schmale, undurchsichtige Gegenstände in einer dem Spalte parallelen Lage aufgestellt und deren Schatten auf einem weißen Schirme aufgefangen: so zeigte sich einmal,

Digitized by Google

daß ihr Schatten breiter war, als nach dem Gesetze der geradlinigen Fortpflanzung des Lichtes erwartet werden sollte, dann aber auch, daß der Schatten von farbigen Streifen, welche seinem Rande und dem Spalte parallel waren, umsäumt wurde. Diese Erscheinung verschwand sofort, sobald der Spalt etwas erweitert wurde.

Bringt man an Stelle des dunkeln Körpers eine Metallplatte, in der sich eine feine Oeffnung befindet, und stellt man hinter derselben den weißen Schirm auf, so erscheinen auf ihm concentrische Ringe aus farbigen Streifen, welche zum Theile innerhalb des geometrischen Bildes der Oeffnung liegen, zum Theil aber außerhalb in den Raum fallen, der eigentlich vollen Schatten haben sollte. Bringt man in der Metallplatte sehr nahe bei einander zwei sehr feine kreisförmige Oeffnungen an, so bemerkt man nicht allein zwei Systeme von concentrischen Ringen, welche sich zum Theil durchkreuzen, sondern außerdem noch drei Systeme von dunkeln parallelen Geraden, welche aber sofort verschwinden, sobald man die eine Oeffnung zuhält (Fig. 237). Dieser letzte Versuch erregte sehr großes Erstaunen unter den Physikern und stieß alle die Vorstellungen um, die man bis dahin über das Wesen des Lichtes gehabt hatte: denn hier war ja der ganz unerwartete Fall eingetreten, daß sich Licht durch Hinzufügung anderen Lichtes in Finsterniß verwandelt hatte.

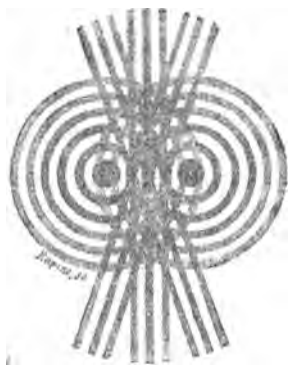


Fig. 237. Grimaldi's Versuch. Dunkle und farbige Streifen durch ein System von zwei kreisförmigen Oeffnungen.

Newton wiederholte und erweiterte die Versuche des italienischen Physikers und suchte zu erklären, worin die merkwürdigen Erscheinungen wohl ihren Grund haben mögen: da er aber in der von ihm angenommenen Emissionstheorie gar zu sehr befangen war, so wußte er nur zu sagen, daß die Lichtstrahlen am Rande der dunkeln Körper wohl eine Ablenkung von ihrem Wege erführen. Ganz anders gestaltete sich dagegen die Untersuchung, als Fraunhofer, Young und besonders Fresnel die Erklärung unter Zugrundelegung der Undulationstheorie zu geben versuchten: nach dieser Lehre bieten die Versuche nun gar keine Schwierigkeiten mehr dar, sondern sind einfache Erscheinungen der Interferenz, wie sie Fresnel mit anderen Hülfsmitteln schon dargestellt hat. Was

Digitized by Google

man aber unter Interferenz der Lichtstrahlen zu verstehen hat, und durch welche Mittel man dieselbe zur Anschauung bringen kann, das wollen wir jetzt zu erklären versuchen.

Nehmen wir an, daß zwei Lichtstrahlen sich in derselben Richtung AB ausbreiten (Fig. 238), und daß sie sowohl gleiche Intensität, als auch gleiche Wellenlänge besitzen, sodaß also die Amplitude bei gleichen Schwingungsphasen dieselbe Größe hat, so können doch noch durch das Zusammentreffen verschiedener Schwingungsphasen mehrere Fälle eintreten, die sich wesentlich von einander unterscheiden. Treffen beide Strahlen zunächst so zusammen, daß sich die Aethertheilchen infolge beider Wellenbewegungen immer nach derselben Seite hin bewegen, so werden sie sich in ihrer Wirkung unterstützen und die Lichtstärke wird doppelt so groß sein, als wenn nur der eine der Strahlen vorhanden wäre. Ist dagegen der eine der beiden Strahlen gegen den anderen gerade um eine halbe Wellenlänge

Fig. 238. Interferenz der Lichtstrahlen.

zurückgeblieben, so werden die Aethertheilchen, welche längs der Linie AB liegen, einestheils durch Kräfte erregt, deren Größe und Richtung durch die Wellenlinie a, anderntheils durch Kräfte, die durch a' dargestellt werden. Jedes Aethertheilchen m wird daher in Ruhe bleiben, weil es gleichzeitig mit gleicher Stärke nach entgegengesetzten Seiten hin gezogen werden soll: die oscillirende Bewegung wird also vernichtet, und an die Stelle des Lichtes tritt Finsterniß. Von zwei Wellen, welche sich in solcher Weise in ihrer Wirkung aufheben, gebraucht man den Ausdruck, daß sie *interferiren*. Ist der Unterschied der beiden Wellen größer oder kleiner als eine halbe Wellenlänge, so wird die Erscheinung zwischen diese beiden äußersten Grenzen fallen, das Licht ist entweder verstärkt, jedoch noch nicht bis zur doppelten Lichtstärke, oder geschwächt, jedoch nicht bis zum vollen Erlöschen.

Diese Ueberlegung genügt vollständig, um Grimaldi's Versuche, wie

Digitized by Google

auch alle anderen, bei denen sich farbige und dunkle Streifen zeigen, zu erklären; es kam nur darauf an, die Richtigkeit dieser Theorie auch noch durch andere Versuche zu bestätigen, und dies ist besonders durch einen von Fresnel erfundenen Apparat, den Interferenzspiegel geschehen, dessen Einrichtung uns zunächst beschäftigen soll.

Zwei Planspiegel ON und OM (Fig. 239) aus Glas, dessen Rückwand geschwärzt ist, sind senkrecht in einem dunkeln Zimmer so aufgestellt, daß sie miteinander einen sehr stumpfen Winkel bilden. Vor diesen Spiegeln wird durch eine sphärische oder eine Cylinderlinse, ein Bündel Sonnenstrahlen in S so concentrirt, daß es sich in einem Lichtpunkte oder einer Lichtlinie vereinigt. Von diesem Punkte S entsteht hinter jedem der beiden Spiegel ein Bild, nämlich s hinter ON, s' hinter OM. Diese beiden Bilder können als neue Lichtquellen angesehen werden, und zwar werden sich die Strahlen, die von ihnen ausgehen, immer in derselben Schwingungsphase bei gleichem Abstande von den beiden Punkten s und s' befinden. Stellt man nun vor den beiden Spiegeln einen Schirm so auf, daß er zugleich die Lichtbündel auffängt, welche von beiden Bildern ausgehen, so wird man auf demselben in der Richtung der Linie OA eine glänzende Linie erblicken, zu beiden Seiten derselben aber eine Reihe von Streifen, die abwechselnd dunkel und hell sind. Sobald man den einen Spiegel verdeckt, verschwinden sofort diese Streifen und der Schirm erscheint gleichmäßig erleuchtet.

Fig. 239. Interferenzspiegel nach Fresnel. Experimenteller Nachweis der Interferenz des Lichtes.

Digitized by Google

Man sieht, daß diese Erscheinung große Aehnlichkeit hat mit dem Versuche, den Grimaldi anstellte, als er ein Lichtbündel durch zwei feine Oeffnungen hindurchgehen ließ: auch hier sieht man, daß an manchen Stellen das Licht verschwindet, wenn von einer anderen Seite Licht hinzu kommt. Es läßt sich dies nur dadurch erklären, daß sich die Lichtstrahlen, welche in einem solchen Punkte zusammentreffen, in entgegengesetzter Schwingungsphase befinden und deshalb interferiren, während sie an den Stellen, welche erleuchtet erscheinen, gleiche Schwingungsphase haben. Das ist es, was Fig. 239 anschaulich machen soll: man sieht in derselben die concentrischen Wellen, die von s und s' ausgehen, sich kreuzen und an verschiedenen Punkten durchschneiden. An denjenigen Punkten, welche, wie a, auf der Linie AO liegen, die die Verbindungslinie ss' senkrecht durchschneidet, langen die Strahlen beider Systeme immer in gleicher Schwingungsphase an, weil die Entfernungen sa und s'a oder richtiger gesagt die Wege, welche die von S ausgehenden und von den Spiegeln zurückgeworfenen Strahlen zurücklegen, nämlich SIa und SI'a, von gleicher Länge sind: in allen Punkten der Linie AO werden sich daher die Strahlen unterstützen und dadurch die hellleuchtende Mittellinie bilden. Seitwärts von dieser Linie aber treffen wir auf Punkte n, n', in denen der Phasenunterschied der beiden Strahlen, die von s und s' dorthin gelangen, eine halbe Wellenlänge beträgt: hier werden also die Wellen interferiren, die Punkte n n' werden daher dunkel erscheinen. Gehen wir auf derselben Seite noch weiter, so treffen wir auf die Punkte b, b', in denen der Phasenunterschied eine ganze Wellenlänge beträgt, was genau ebensogut ist, als wenn gar kein Phasenunterschied vorhanden wäre: b b' sind daher wieder erleuchtet. In gleicher Weise sind auf der anderen Seite die Punkte m, m' dunkel, die Punkte c c' hell.

Fresnel hat diesen Versuch der Reihe nach auf alle Farben des Sonnenspectrum ausgedehnt und hat für alle den Wechsel heller und dunkler Linien nachgewiesen: es zeigte sich hierbei, daß die Zwischenräume beim rothen Licht am breitesten, beim violetten am engsten waren. Dadurch, daß diese Entfernungen mit großer Sorfalt gemessen wurden, ist es auch gelungen, die Wellenlänge für die verschiedenen Farben, die wir oben anführten, und daraus die Zahl der Schwingungen in einer Secunde zu bestimmen. Wendet man bei dem Fresnel'schen Interferenzspiegel weißes Licht an, so erscheinen nicht dunkle Linien, sondern Streifen,

Digitized by Google

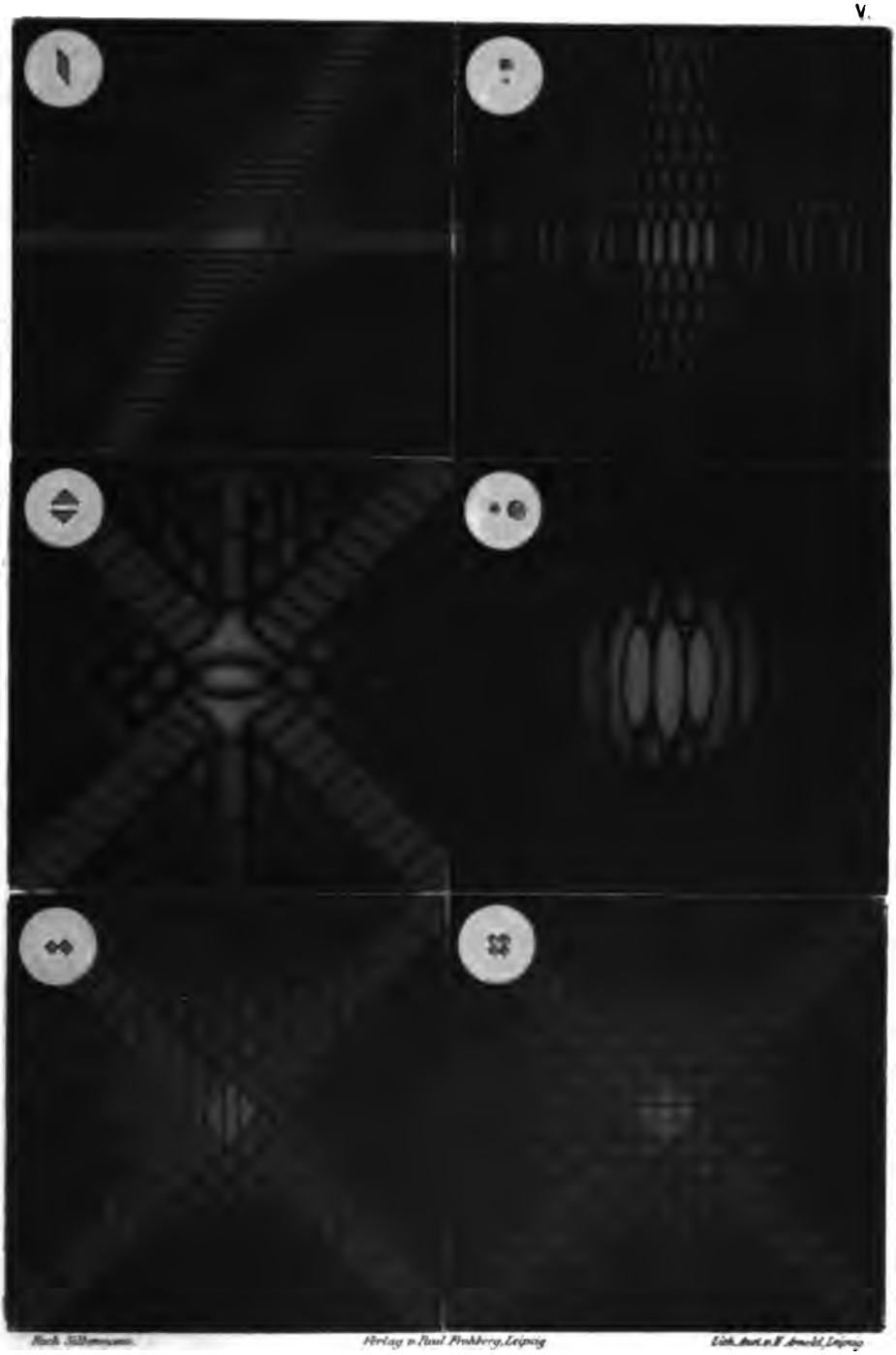
welche der Reihe nach alle Farben des Regenbogens zeigen: denn da die Wellenlänge für die einzelnen Farben verschieden ist, so werden in keinem Punkte alle Strahlen zugleich interferiren. An jedem Punkte fehlt immer nur eine Farbe, und deshalb wird diese Stelle in der Farbe erscheinen, die der fehlenden complementär ist.

Durch diese Versuche ist die Richtigkeit der Undulationstheorie in glänzender Weise bestätigt worden: diese Lehre hat selbst aber wieder Veranlassung zu einer Reihe neuer Entdeckungen gegeben, die zum größeren Theil früher theoretisch abgeleitet wurden, ehe die Versuche sie bestätigten.

§ 2. Erscheinungen der Diffraction.

Wir kehren wieder zu den Erscheinungen der Diffraction zurück, deren Erklärung wir in der Interferenz der Lichtstrahlen finden, werden aber aus der ungeheuren Zahl derselben nur einige der wichtigeren auswählen. Als Newton die Versuche Grimaldi's über die Vergrößerung des Schattens dünner Körper, wie z. B. der Haare, Fäden, Nadeln, Halme, wiederholte und in mancher Beziehung abänderte, so überzeugte er sich bald, daß die Ablenkung der Lichtstrahlen nicht dadurch bewirkt werden konnte, daß dieselben, wie man früher annahm, in einer feinen Schicht verdichteter Luft, welche sich an der Oberfläche der Körper ansammeln sollte, eine Brechung erlitten. Er sah, daß die Bildung der Streifen von der Natur der Stoffe, welche er der Prüfung unterzog, ganz unabhängig war: mochten die Gegenstände, welche er einschaltete, aus Metall, Stein, Glas, Holz, Eis, u. s. w. bestehen, so erkannte er immer drei Gruppen von Streifen, welche vom Schatten aus gerechnet in dieser Reihe aufeinanderfolgten: die erste Gruppe bestand aus Violet, Dunkelblau, Hellblau, Grün, Gelb und Roth; die mittlere aus Blau, Gelb und Roth und die äußerste aus denselben drei Farben, welche nur viel lichtschwächer erschienen. Zugleich beobachtete er auch die Thatsache, daß die einfachen Farben des Spectrum Streifen von verschiedener Breite geben. Aus allen diesen Versuchen zog er aber keinen anderen Schluß, als daß die Lichtstrahlen, wenn sie am Rande der Körper vorübergehen, Ablenkung erfahren, die um so stärker sind, je näher die Oberfläche von den Strahlen gestreift wird: eine wirkliche Erklärung der Erscheinung wußte er aus der Emissionstheorie nicht zu geben.

Digitized by Google



Nach Silbermann. Verlag v. Paul Frohberg, Leipzig. Lith. Anst. v. F. Arnold, Leipzig.

INTERFERENZERSCHEINUNGEN.

Beugung durch kleine Oeffnungen.

EINFARBIGE STREIFEN.

Digitized by Google

LIBRARY
OF THE
UNIVERSITY
OF
CALIFORNIA

Digitized by Google

Alle die zahlreichen Versuche, welche bisher über diesen Gegenstand angestellt worden sind, kann man in zwei Gruppen theilen: die erste Gruppe umfaßt diejenigen Beugungserscheinungen, welche durch geradlinige Ränder, z. B. durch eine oder mehrere sehr enge Spalten mit parallelen Rändern, hervorgebracht werden: die zweite umfaßt die Erscheinungen, welche man erhält, wenn man Lichtbündel durch eine oder mehrere sehr kleine Oeffnungen von dreieckiger, viereckiger oder Kreisform, oder um die Ränder einer sehr kleinen kreisförmigen Blende herumgehen läßt. Die Erscheinungen, welche man in einigen dieser Fälle beobachtet, sind auf Tafel IX*) und X dargestellt, und zwar zeigt die erste Tafel Erscheinungen, bei welchen homogenes rothes Licht angewendet wurde, die andere aber Erscheinungen mit Benutzung von weißem Lichte: in vielen Fällen

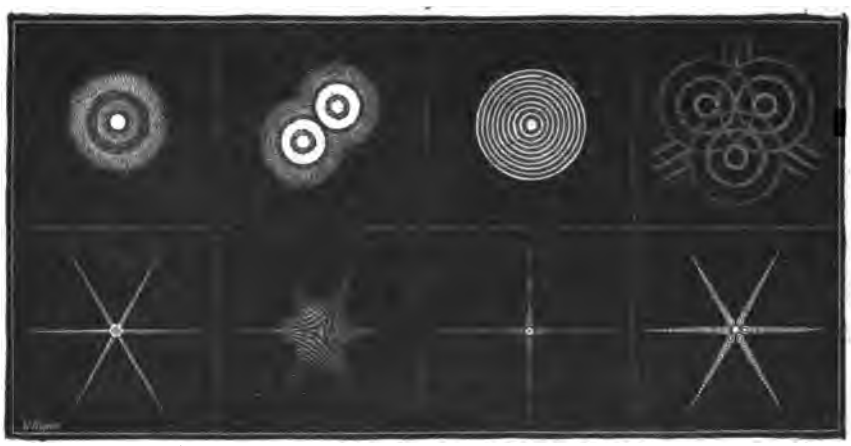


Fig. 240. Diffractionserscheinungen in Fernrohren nach J. Herschel.

zeigen sich hierbei die lebhaftesten Spectralfarben, welche zur Erhöhung der Schönheit der Erscheinungen wesentlich beitragen.

John Herschel hat sehr merkwürdige Diffractionserscheinungen beobachtet, indem er vor das Objectiv eines astronomischen Fernrohres Blenden befestigte, in denen sich kleine Oeffnungen von verschiedener Form befanden, und durch dieselben mehrere einfache und Doppelsterne beobachtete. Durch eine kreisförmige Oeffnung erhielt er farbige Ringe, welche die Bilder der Lichtpunkte umgaben, und zugleich erschienen die Sterne mit breiter leuchtender Fläche, ähnlich wie die Planeten. Dreieckige Oeffnungen

*) Tafel IX ist irrthümlicher Weise als Tafel V bezeichnet worden.

Digitized by Google

dagegen gab sechszackige Sterne; eine Oeffnung, welche aus zwölf Quadraten bestand, gab einen vierzackigen Stern; und so beobachtete er noch verschiedene andere Formen, von denen Fig. 240 einige darstellt.

Alle diese Versuche gewähren schon durch den Glanz ihrer Erscheinung und durch die Pracht der Farben dem Auge des Laien ein großes Interesse: von weit größerer Wichtigkeit aber sind sie für den Naturforscher selbst; denn jeder derselben ist ein neuer Beweis für die Richtigkeit der Undulationstheorie, und bei jedem zeigt sich immer wieder die schöne Uebereinstimmung der Beobachtungen mit den Resultaten, zu denen die mathematische Analysis führt, durch welche viele der Erscheinungen schon zuvor berechnet worden waren, ehe die Beobachtung sie bestätigte. Einer der merkwürdigsten derartigen Fälle ist der folgende: Poisson hatte durch Rechnung gefunden, daß, wenn Licht von einem einzigen Punkte ausgeht, auf eine sehr kleine, undurchsichtige Scheibe trifft und dann von einem Schirme aufgefangen wird, sich in der Mitte des Schattens dieser Scheibe eine helle Stelle befinden müsse. Da dies nun, wie er glaubte, nicht der Fall sei, so glaubte er hierin einen Beweis gegen die Undulationstheorie zu finden. Nun stellte aber Arago den Versuch mit der größten Sorgfalt an, indem er eine kleine Metallscheibe in eine durchaus homogene und durchsichtige Glasplatte einkittete, und da zeigte sich, daß Poisson's Rechnung vollständig durch den Versuch bestätigt wurde, indem die Scheibe im Schatten wie durch eine Oeffnung durchbohrt, wie ein Ring erschien. Also auch dieser Versuch, der in der Erwartung angestellt war, daß er die Undulationstheorie widerlegen würde, schlug zu einer glänzenden Bestätigung derselben aus.

Die Lehre von der Diffraction oder Beugung der Lichtstrahlen wurde wesentlich gefördert durch die Bemühungen Fraunhofers, dem die Wissenschaft schon die wichtige Entdeckung der dunkeln Linien im Sonnenspectrum verdankt: nachdem dieser berühmte Physiker die Bilder beobachtet hatte, welche durch mehrere feine Oeffnungen entstehen, kam er auf den Gedanken, die Erscheinungen zu untersuchen, die sich zeigen, wenn das Licht durch ein sehr enges Gitter, das aus sehr feinen Fäden gebildet ist, hindurchgeht. Zunächst fertigte Fraunhofer solche Gitter dadurch an, daß er sehr feine Messingdrähte über einen quadratischen Rahmen spannte: die Gleichheit der Abstände der einzelnen Drähte regulirte er hierbei durch feine Schrauben. Später bedeckte er, um noch feinere und regelmäßigere

Digitized by Google

Zwischenräume zwischen den Spalten, die das Licht durchlassen, zu erhalten, Glasplatten mit feinen Goldblättchen und ritzte in dieselben die Spalten ein, und endlich ritzte er mit dem Diamanten die Streifen unmittelbar in das Glas, was ihm so vollkommen gelang, daß er mehr als tausend solcher Striche auf den Raum eines Millimeters brachte: jeder dieser eingeritzten Streifen konnte als dunkler Schirm gelten, während das Licht durch ihre Zwischenräume frei hindurchgehen konnte. Für die Beobachtung der Beugungserscheinungen ist dieser enorme Grad von Feinheit nicht erforderlich: es genügt hierzu schon, daß sich 38 Linien auf dem Millimeter befinden. Außer den Gittern mit nur parallelen Streifen wendete Fraunhofer auch solche an, bei denen sich zwei Systeme von Linien rechtwinklig durchschnitten, sodaß die Maschen die Form von Quadraten erhielten, ferner Gitter mit kreisförmigen Maschen, und viele andere Formen, und erhielt dadurch eine sehr große Zahl von Bildern, bei denen die dunkeln Linien und farbigen Spectra mit bewundernswerther Regelmäßigkeit vertheilt waren: diese Bilder aber unterwarf er einer sorgfältigen Prüfung und zeigte, daß sie mit den aus der Theorie abgeleiteten Resultaten vollständig übereinstimmten.

Auf Tafel X sieht man rechts in der Mitte die Erscheinung dargestellt, die sich ergiebt, wenn das Licht durch ein Gitter mit parallelen Streifen geht: in der Mitte erscheint eine helle Linie, neben der sich zwei breite dunkle Streifen befindet; dann folgen zwei vollständige Spectra, bei denen sich das Violet nach Innen zu befindet, und welche die Farben in absoluter Reinheit und Schönheit zeigen; an diese reihen sich, wieder durch dunkle Linien getrennt, noch mehrere Spectra, die sich immer mehr ausbreiten, und deren Farben immer matter werden. Unterhalb dieser Abbildung zeigt dieselbe Tafel das Spectrum, wie es durch ein Gitter gebildet wird, dessen Maschen quadratisch sind: außer zwei Spectren, die rechtwinklig zu einander und dem vorigen sehr ähnlich sind, sieht man hier noch in den vier rechten Winkelräumen eine Reihe kleiner Spectra, die vom Mittelpunkte ausstrahlen. Daß Diffractionserscheinungen eintreten müssen, wenn ein Lichtstrahl durch ein Gitter hindurchgeht, wußte schon Newton, wie aus folgender Stelle seiner Optik hervorgeht: „Betrachtet man die Sonne durch eine Federfahne oder durch ein schwarzes Band, welches man dicht vor das Auge hält, so sieht man mehrere Regenbogen, die dadurch enstehen, daß die Schatten, welche die einzelnen Fasern oder

Digitized by Google

Fäden auf die Netzhaut werfen, von parallelen farbigen Streifen umsäumt werden." Das Spectrum, welches entsteht, wenn das Sonnenlicht durch das Gitter geht, welches die Posen einer Federfahne bilden, ist in Fig. 1, Tafel X, abgebildet: ähnliche Erscheinungen kann man auch erblicken, wenn man mit fast geschlossenen Augen nach der Flamme einer Kerze blickt, indem dann die Augenwimpern ein etwas unregelmäßiges Gitter bilden

Durch die Interferenz der Lichtstrahlen lassen sich auch die schönen Farben erklären, welche sich an der Oberfläche mancher Körper zeigen, wenn dieselbe von einer Menge feiner Linien durchfurcht ist: so sind die Federn mancher Vögel und besonders die Perlmutter mit einer sehr großen Zahl feiner Streifen bedeckt, welche bewirken, daß jene Körper in allen Farben des Regenbogens spielen. Als Brewster einst ein Stück Perlmutter mittels eines Kittes aus Harz und Wachs an einem Goniometer befestigt hatte, bemerkte er zu seinem großen Erstaunen, daß das Wachs nach Entfernung der Perlmutter eine ebenso glänzende farbige Oberfläche zeigte, wie diese Substanz: er wiederholte den Versuch mit anderen Klebmitteln, mit Blei, Zinn, leichtflüssigem Metall, Realgar, Fischleim, und immer bemerkte er dieselbe auffällige Erscheinung. Diese Entdeckung machte sich der Engländer J. Barton zu Nutze: er ritzte auf Stahlplatten eine Menge sehr feiner Linien ein und drückte gegen diese Platten Knöpfe und andere Schmuckgegenstände aus einem weicheren Metalle, welche nun dasselbe Farbenspiel, denselben Glanz zeigten, wie die Perlmutter, und wegen ihrer Schönheit vielfache Anwendung fanden.

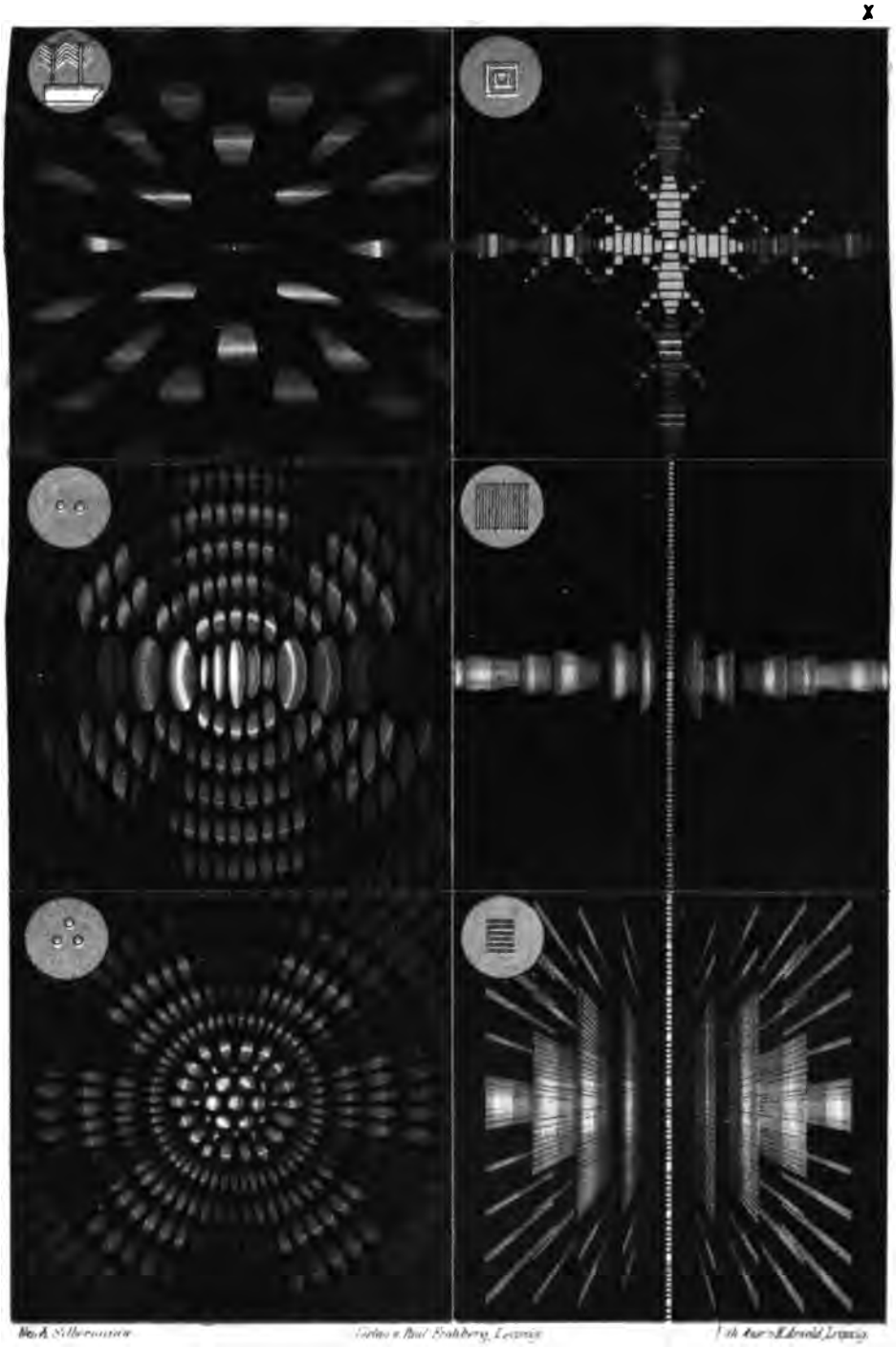
Fig. 241. Streifen der Perlmutter, welche bei sehr starker Vergrößerung sichtbar werden.

§ 3. Farben dünner Platten.

Die schönsten und glänzendsten Erscheinungen sind nicht immer diejenigen, welche zu ihrer Herstellung die theuersten und zusammengesetztesten Apparate und sonstige Vorrichtungen erfordern: auch mit den einfachsten

Digitized by Google

X



Wm. A. Silbermann — Verlag v. Paul Frohberg, Leipzig — Lith. Anst. v. E. Arnold, Leipzig

INTERFERENZERSCHEINUNGEN

Beugung durch Gitter.

VIELFARBIGE STREIFEN

Digitized by Google

Digitized by Google

Hülfsmitteln zeigt sich genug des Wunderbaren. Wer hätte z. B. sich in seiner Jugend nicht damit vergnügt, mit ein wenig Seifenwasser, einem Federkiele oder einer Tonpfeife jene leichten Kugeln aufzublasen und in die Luft zu schleudern, die eine so vollkommen reine Form und so schöne verschiedene Farben besitzen? Wenn im Anfange diese Kugel nur einen geringen Durchmesser besitzt, so ist die Haut, die ihre Umrisse begrenzt, einfarbig und durchsichtig. Je mehr Luft man nun in das Innere hineinbläst, desto stärker wird der Druck auf die innere hohle Fläche der Kugel; hierdurch muß sich der Durchmesser vergrößern, was aber nur auf Kosten der Dicke geschehen kann. Sobald die Dicke der Wand nun unter einen gewissen Grade herabgesunken ist, so zeigt sich an ihrer Oberfläche eine Reihe von Farben, welche zunächst schwach auftreten, allmählich aber an Lebhaftigkeit gewinnen, sich gegenseitig ersetzen und in ihrer Mischung eine Menge der feinsten Farbennüancen bilden. Wird endlich die Wand so dünn, daß sie dem Drucke des Gases in ihrem Innern nicht genug Widerstand entgegensetzen kann, so zeigen sich zunächst auf dem Gipfel der Kugel schwarze Flecke, und bald darauf platzt die Blase: diese Periode der Erscheinungen ist auf Tafel XI dargestellt; man sieht dort im oberen Theile der flüssigen Kugel die schwarzen Flecken, welche das baldige Ende der Erscheinung verkünden.

Dieser einfache Versuch, der den Augen der jugendlichen Künstler, die sich so gern an bunter Farbenpracht erfreuen, ein so großes Ergötzen gewährt, ist noch von viel größerem Interesse für den Gelehrten, welcher den Geheimnissen der Natur nachforscht: an diesen Versuch knüpft Newton seine Forschungen und auf ihn baut er eine Reihe der merkwürdigsten Untersuchungen, und noch heute nehmen die Farben der Seifenblase einen wohlberechtigten Platz unter den merkwürdigsten Erscheinungen der Optik ein. Im Grunde ist dieser Versuch nur ein einzelner Fall aus einer ganzen Reihe von Erscheinungen, welche man stets beobachtet, wenn das Licht an den Oberflächen, welche dünne Blättchen durchsichtiger Körper begrenzen, abwechselnd gebrochen und reflectirt wird. Derartige Erscheinungen zeigen sich ebensowohl bei festen als bei flüssigen und luftförmigen Körpern: die Krystalle, die durch ihre Structur in sehr dünne Blättchen zerfallen, wie Glimmer, Gips und Talk, sehr dünngeblasenes Glas, die Oberfläche des Stahles, den man hat anlaufen lassen, d. h. der mit einer sehr dünnen Oxydschicht bedeckt ist, zeigen Farben, welche denen der

Digitized by Google

Seifenblase gleichen. Ebenso gehören in die Reihe dieser Erscheinungen die lebhaften Farben, welche auf den feinen Häuten der Flügel der Libellen, auf der Oberfläche der Gläser die der Feuchtigkeit lange ausgesetzt waren, auf dem Spiegel schmutzigen Wassers, das mit einer dünnen Fettschicht bedeckt ist, entstehen. Man bezeichnet alle diese Erscheinungen in der Physik als Farben dünner Blättchen und nennt den Vorgang selbst Irisiren.

Ehe wir die Ursache für diese Zerlegung des Lichtes in seine einfachen Farben angeben, wollen wir erst erwähnen, unter welchen Bedingungen diese Erscheinung eintritt und welche Gesetze die Reihenfolge der Farben, welche miteinander abwechseln, bestimmen. Die Erscheinung, von welcher Newton bei diesen Untersuchungen ausging, wird von ihm selbst in seiner Optik folgendermaßen beschrieben: als er zwei Prismen sehr stark gegen einander preßte, damit sich ihre Flächen (welche zufällig ein wenig convex waren) vollständig berührten, so bemerkte er, daß die

Fig. 242. Entstehung der Newton'schen Farbenringe.

Stelle, wo sie fest aufeinander lagen, vollständig durchsichtig war, als wenn sie hier aus einem einzigen Stücke Glas bestanden hätten. Denn selbst, wenn Licht so schief auf die Grenzfläche fiel, daß es an derselben hätte total reflectirt werden müssen, sobald sich hinter ihr Luft befand, so trat diese totale Reflexion doch nicht ein, als sich beide Prismen genau berührten, sondern das Licht ging ungehindert aus dem einen in das andere über. Der Berührungspunkt selbst erschien im Innern der Prismen wie ein schwarzer Fleck oder ein Loch, durch welches man die dahinter befindlichen Gegenstände deutlich sehen konnte. Als nun Newton die Prismen um ihre gemeinsame Axe drehte, so sah er um den durchsichtigen Fleck eine Reihe von Ringen, welche abwechselnd dunkel und hell und verschieden gefärbt waren. Um diese Erscheinungen genauer zu ergründen, benutzte er eine sehr flache Linse, legte dieselbe auf eine ebene Glasplatte und drückte sie leicht gegen dieselbe. Hierdurch berührten sich die beiden Flächen in einem Punkte, um welchen herum ihr gegen-

Digitized by Google

seitiger Abstand immer größer wird, aber noch bis zu einiger Entfernung ziemlich gering bleibt (Fig. 242).

Als Newton nun von diesen Gläsern Licht reflectiren ließ, das nahezu rechtwinklig zur Grenzfläche auffiel, so bemerkte er, daß sich um den Berührungspunkt verschiedenfarbige Ringe bildeten, welche unter sich concentrisch waren und immer schmäler wurden, einen je größeren Abstand sie vom Mittelpunkte hatten. Jede Farbe erschien zuerst als eine Kreisfläche von gleichartiger Färbung, welche sich durch stärkeren Druck immer weiter ausdehnte, dann als Ring loslöste, um einer neuen Farbe um

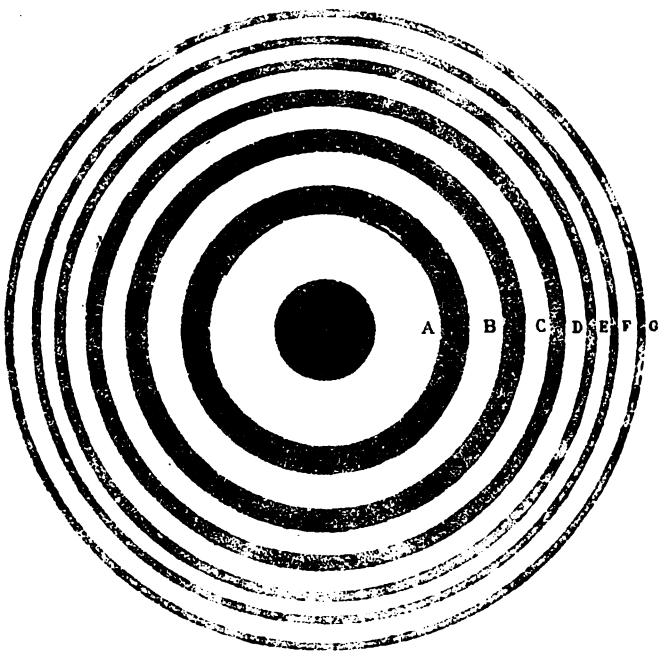


Fig. 243. Newton'sche Farbenringe.

den Mittelpunkt herum Platz zu machen. Im Mittelpunkt selbst erschien schließlich bei genügendem Drucke stets ein schwarzer Fleck. Die Farben folgen in den Newton'schen Ringen, die in Fig. 243 dargestellt sind, vom Mittelpunkte O in dieser Reihe:

Von O—A: Schwarz, Blau, Weiß, Gelb, Roth;
„ A—B: Violet, Blau, Grün, Gelb, Roth;
„ B—C: Purpur, Blau, Grün, Gelb, Roth;
„ C—D: Grün, Roth;
„ D—E: Blaugrün, Roth;

Digitized by Google

Von E—F: Blaugrün, blaß Roth;
„ F—G: Blaugrün, röthlich Weiß.

Läßt man dagegen das Licht nicht von den Gläsern reflectiren, sondern blickt man durch dieselben nach dem hellen Himmel, so sieht man auch in diesem Falle eine Reihe farbiger Ringe, welche aber viel blasser erscheinen, als die durch Reflexion gebildeten; weiter ist auch die Reihenfolge der Farben eine andere, und in der Mitte erscheint an Stelle des schwarzen ein weißer Fleck. Im durchgehenden Lichte folgen die Farben in dieser Reihe:

Weiß, Orange, Schwarz, Violet, Blau;
Weiß, Orange, Violet, Blau;
Grün, Orange, Blaugrün, Roth;
Blaugrün;
Roth, Blaugrün;
Roth.

Vergleicht man diese Uebersicht mit der oben aufgestellten, so sieht man, daß die Farben, welche in beiden an derselben Stelle erscheinen, complementär sind, sodaß der Strahl, der in einem bestimmten Punkte reflectirt wird, und der Strahl, welcher in demselben Punkte hindurchgeht, zusammen weißes Licht geben würden. Durch Anwendung von Spiegeln ist es Young und Arago gelungen, das Bild der Ringe, die sich im reflectirten Lichte zeigen, mit dem Bilde der Ringe im durchgelassenen Lichte für das Auge zur Deckung zu bringen: da sich nun in diesem Falle zeigte, daß, wenn beide Bilder gleich intensiv waren und genau aufeinander fielen, die Ringe vollständig verschwanden, so war die Richtigkeit der Annahme bewiesen, daß die Farben vollständig complementär sind.

Benutzt man bei diesen Versuchen einfarbiges Licht, so sieht man immer nur dunkle Linien mit hellen abwechseln, welche letztere nur verschiedene Töne der Farbe sind, welche das Licht hat; die Durchmesser der Ringe aber sind für die einzelnen Farben des Spectrum von verschiedener Größe: für das Roth sind die Ringe am weitesten, für das Violet am engsten. Daß sich bei Anwendung von weißem Lichte die verschiedenen Farben des Spectrum zeigen, läßt sich nun hieraus auch sehr leicht begreifen: denn, da die Ringe der einzelnen Farben verschiedene Weite haben, so können sie nirgends alle genau zusammen passen und

Digitized by Google

weißes Licht geben; überall aber, wo für eine der Farben ein schwarzer Ring entsteht, wo dieselbe also fehlt, muß sich das Licht in der Complementärfarbe zeigen. Nur an einer einzigen Stelle zwischen O und A sind alle in geeignetem Mischungsverhältnisse vorhanden, sodaß dort weißes Licht entsteht. Bringt man Wasser zwischen die beiden Gläser, so zeigen sich auch Ringe, dieselben sind aber viel enger, dichter und weniger deutlich; wird dagegen zwischen den Gläsern die Luft entfernt, so bemerkt man an der Erscheinung kaum eine Aenderung.

Der Art waren die Erscheinungen, von welchen Newton ausging, und durch die er zu einem allgemeinen gültigen Principe gelangte, aus dem die oben erwähnten Erscheinungen des Irisiren dünner Blättchen ihre volle Erklärung fanden. Indem er nämlich die Durchmesser der einzelnen Ringe im reflectirten einfarbigen Lichte in dem Falle maß, daß das Erscheinen eines sehr kleinen schwarzen Fleckes anzeigte, daß die Linse von der Glastafel soeben berührt wird, erkannte er folgendes einfaches Gesetz:

Beim reflectirten, einfarbigen Lichte verhalten sich die Quadrate der Durchmesser der hellen Ringe, wie die ungeraden Zahlen 1, 3, 5, 7, ..., die Quadrate der Durchmesser der dunklen Ringe, wie die geraden Zahlen 2, 4, 6, 8, ...

Da sich beim durchgehenden Lichte jeder helle Ring in einen dunklen verwandelt, und umgekehrt, so gelten für diesen Fall dieselben Gesetze, nur daß die beiden Zahlenreihen mit einander zu vertauschen sind. Vergleicht man nun hiermit die Dicke der Luftschicht an den einzelnen Stellen zwischen beiden Gläsern, so erkennt man aus geometrischen Gründen, daß dieselbe ebenfalls mit dem Quadrate des Abstandes vom Berührungspunkte wächst: also auch die Dicken der Luftschichten an den Stellen, wo dunkle Ringe entstehen, verhalten sich wie die ungeraden, an den Stellen, wo sich helle Ringe zeigen, wie die geraden Zahlen: der Einfluß der Dicke der Luftschicht auf das Erscheinen oder Verschwinden des Lichtes ist somit unzweifelhaft dargethan, während sich die Natur des Glases, das zu dem Versuche verwendet wurde, als gleichgiltig zeigte.

Newton versuchte nun diese Erscheinung aus der Emissionstheorie zu erklären, zu welchem Behufe er die Annahme machte, daß das Licht bei seiner Ausbreitung periodisch in zwei verschiedene Zustände gerathe, in

Digitized by Google

denen es das eine Mal leicht reflectirt, aber nicht gebrochen, das andere Mal leicht gebrochen, aber nicht reflectirt werde. Viel einfacher gestaltet sich dagegen die Erklärung, wenn wir die Undulationstheorie zu Grunde legen: denn nach ihr sind diese Vorgänge nichts weiter, als Interferenzerscheinungen, wie beim Fresnel'schen Interferenzspiegel. Trifft nämlich ein Strahlenbündel auf die erste Grenzfläche einer sehr dünnen Platte, so wird es zum Theil reflectirt, zum Theil dringt es in das Innere, wo es auf die zweite Grenzfläche trifft, welche wieder einen Theil desselben zurückwirft: diese beiden zurückgeworfenen Strahlen setzen nun gemeinsam ihren Weg fort und dringen gemeinsam in unser Auge. Da aber der zweite Strahl einen etwas längeren Weg hat zurücklegen müssen, so wird er in seinen Schwingungen gegen den ersten etwas zurückbleiben: beträgt nun dieser Unterschied eine ungerade Anzahl halber Wellenlängen, so interferiren die Wellen, d. h. sie heben sich in ihrer Wirkung auf und es entsteht Dunkelheit; sind dagegen die Wellen in ihrer Bewegung um eine gerade Anzahl halber Wellenlängen von einander verschieden, so unterstützen sie sich und die Platte sendet Licht zurück.

Legt man nun auf eine ebene Glastafel eine Linse, so hat die Luftschicht zwischen beiden an verschiedenen Stellen verschiedene Dicke: es werden an den Stellen, wo der zweite Strahl gegen den ersten um 1, 3, 5, 7, ... halbe Wellenlängen zurückbleibt, dunkle Ringe entstehen; helle dagegen dort, wo der Unterschied 2, 4, 6, 8, ... halbe Wellenlängen beträgt. Da nun die Wellenlänge für die einzelnen Farben, wie wir früher besprachen, sehr verschieden ist, da das Roth die längsten, das Violet die kürzesten Wellen besitzt, so muß das Violet auch in einem Theile zum ersten Male interferiren, wo die Luftschicht dünner ist, als da, wo sich die Interferenz des Roth zuerst zeigt: die Ringe sind daher beim violetten Lichte enger, als beim rothen.

Will man das Irisiren der Seifenblasen genau beobachten, so ist es erforderlich, daß dieselben vor den Bewegungen der äußeren Luft geschützt werden: denn, wenn diese Bewegungen auch noch so schwach sind, so genügen sie doch, um die Dicke der Wand unregelmäßig zu ändern und dadurch die Farben in einander zu verschieben, sodaß eine exacte Beobachtung unmöglich wird. Daher empfiehlt Newton, daß man die Blasen im Innern einer sehr durchsichtigen Glasflasche, durch deren Kork ein Rohr geleitet ist, entstehen läßt (Fig. 244). Führt man den Ver-

Digitized by Google

Lith. Inst. v. H. Arnold, Leipzig

INTERFERENZERSCHEINUNGEN.

farbige Ringe dünner Blättchen.

SEIFENBLASE.

Digitized by Google

RARY
THE
VERSITY
OF
IFORNIA

Digitized by Google

ſuch mit dieſen Vorſichtsmaßregeln aus, ſo ſieht man, wie die Farben zuerſt am höchſten Punkte der Seifenblaſe erſcheinen und ſich dann allmählich über die Kugel nach unten verbreiten, in dem Maße, wie ſich das Waſſer nach dem tiefſten Punkte hinzieht und dadurch die Schichten von oben her immer dünner werden. So gleiten die Farben nach einander in Form von Ringen über die Kugel hinweg und verſchwinden am unteren Ende derſelben, und auch auf einer im Freien gebildeten Seifenblaſe, wie ſie auf Tafel XI dargeſtellt iſt, laſſen ſich manchmal einzelne ſolcher Zonen, wenn auch nicht in voller Regelmäßigkeit, unterſcheiden. Sobald nun die Kugel an ihrem oberſten Punkte einen ſehr hohen Grad von Feinheit erreicht hat, zeigt ſich an dieſer Stelle ein ſchwarzer Fleck, der ſich, oft noch untermiſcht mit kleineren Flecken von noch tieferer Färbung, ebenfalls über die Kugel verbreitet: allein, ſobald dieſer Fleck einige Ausdehnung erlangt hat, zerplatzt ſofort die Blaſe. Nach Newton folgen die Farben in dieſer Reihe auf einander: Roth und Blau in dreifacher Wiederholung; dann Roth und Grün; Roth, Gelb, Grün, Purpur; Roth, Gelb, Grün, Blau, Violet; Roth, Gelb, Weiß, Blau, Schwarz.

Fig. 244. Farbige Ringe bei einer Seifenblaſe.

Vergleicht man dieſe Reihe mit der Folge der Farben bei den Newton'ſchen Ringen, ſo ſieht man, daß ihre Reihenfolge gegen dieſe gerade umgekehrt iſt, wie auch nach der Entſtehung der Erſcheinung zu erwarten war. Denn Anfangs iſt die Wand der Blaſe zu dick, als daß ſich irgend welche Interferenzfarbe zeigen könnte; aber je dünner ſie wird, deſto mehr ſtimmt die Erſcheinung mit denen überein, die ſich in der

Digitized by Google

Luftschicht unter der Linse zeigen muß, die allmählich dem Berührungspunkte immer näher liegt: das Schwarz am Ende der Erscheinung entspricht der farblosen Stelle an dem Punkte, wo sich die Linse und die ebene Glastafel berühren.

Bei der Aufstellung der Reihenfolge der Farben haben wir vorausgesetzt, das wir das von der Seifenblase reflectirte Licht auf unser Auge wirken lassen, daß wir z. B. das Bild des hellen Himmels in ihr durch Spiegelung erblicken: sehen wir dagegen durch sie hindurch nach dem Himmel, so erscheint sie uns in derjenigen Färbung, die mit der reflectirten Farbe complementär ist. Bildet man eine Seifenblase in freier Luft, so zeigt sie ein weit lebhafteres Farbenspiel und einen viel regeren Wechsel, als die in der Flasche eingeschlossene, weil durch den freien Luftzug ein beständiges Strömen in der Flüssigkeit, welche die Wand bildet, entsteht und dadurch die Dicke der Wand immer an verschiedenen Punkten Aenderungen erleidet: was aber die Erscheinung bei Anwendung der Flasche an Schönheit einbüßt, das gewinnt sie an Interesse für das Verständniß der Thatsachen durch die Regelmäßigkeit, mit der die Vorgänge auf einander folgen.

Schließlich wollen wir noch erwähnen, daß man aus der Farbe rückwärts einen Schluß auf die Dicke der Wand machen kann, wenn man nur die Länge der Lichtwellen für die einzelnen Farben kennt: und so läßt sich leicht berechnen, daß das Schwarz eintreten muß, sobald die Dicke der Wand unter den zehntausendsten Theil eines Millimeters herabsinkt; könnte man eine Seifenblase herstellen, deren Wand nirgends größere Stärke besäße, so würde dieselbe durchaus unsichtbar sein.

Fünftes Kapitel.

Doppelte Brechung des Lichtes. — Polarisation.

§ 1. Erscheinungen der doppelten Brechung in den Krystallen.

Als im Jahre 1669 der berühmte dänische Arzt Erasmus Bartholinus Krystalle untersuchte, welche ihm ein Freund von der Insel Island mitgebracht hatte, so staunte er nicht wenig, als er bemerkte, daß durch dieselben alle Gegenstände doppelt erschienen: er veröffentlichte diese wich-

Digitized by Google

tige Entdeckung in einer Schrift, in welcher er seine Beobachtungen mit allen Nebenumständen auseinandersetzte, und lenkte dadurch die Aufmerksamkeit auf eine Erscheinung, welche auf die ganze Entwickelung der Lehre vom Lichte von größtem Einflusse war, und die man mit dem Namen der doppelten Brechung der Lichtstrahlen bezeichnet. Zwanzig Jahre später wiederholte Huyghens die Versuche, die Bartholinus angestellt hatte, erforschte die Gesetze, nach denen sie vor sich gingen, und suchte dieselben aus der Undulationstheorie, welche dieser große Physiker aufgestellt hatte, zu erklären. Seit jener Zeit ist man nun unablässig bemüht gewesen, diese Erscheinung weiter zu verfolgen, und einmal dadurch, daß man immer neue Körper derselben Untersuchung unterwarf, andererseits dadurch, daß man die Theorie zu immer größerer Vollkommenheit ausbildete, ist dieser Gegenstand zu einem der wichtigsten Kapitel der Optik angewachsen. Wenn wir uns jetzt zu den merkwürdigsten Erscheinungen der doppelten Brechung wenden, so wird es zum besseren Verständnisse nothwendig sein, daß wir zuvor noch einmal an die Vorgänge erinnern, die eintreten, wenn ein Strahlenbündel die Oberfläche eines nicht krystallisirten durchsichtigen Körpers, wie Glas oder Wasser trifft.

Sobald das Strahlenbündel die Oberfläche eines solchen Körpers trifft, so wird ein Theil der Strahlen in regelmäßiger Weise zurückgeworfen, sodaß durch Reflexion ein Spiegelbild des Körpers entsteht, der das Licht aussendet; ein anderer Theil wird unregelmäßig zerstreut: beide Theile kehren in das Mittel zurück, aus dem das Licht kommt; sie ändern ihren Weg, aber nicht das Mittel, in dem sie sich bewegen. Ein letzter Theil endlich dringt in den durchsichtigen Körper ein und pflanzt sich in demselben wieder geradlinig fort. Trifft in diesem Falle der Strahl senkrecht gegen die Grenzfläche, so behält er seine Richtung bei, trifft er dagegen unter einem schiefen Winkel auf, so wird er gebrochen: auf alle Fälle ist er aber einfach und bleibt auch einfach, wenn er das durchsichtige Mittel verläßt, sodaß das Auge, in welches er eindringt nur ein einziges Bild der Lichtquelle sieht. So gestaltet sich die Erscheinung beim Wasser, Glas und andern ähnlichen Körpern: daß aber nicht in allen Fällen der Vorgang so einfach ist, daß es Stoffe giebt, in welchen sich das Strahlenbündel in zwei vollständig getrennte Aeste spaltet, das ist durch die Entdeckung, die Bartholinus machte, unzweifelhaft geworden.

Man findet in den Hohlräumen metamorphischer Kalklager, sowie

Digitized by Google

auch in dichten Mergellagern ein Mineral, welches in Form von Rhomboëdern kryſtalliſirt, die von ſechs rhombiſchen Flächen begrenzt werden, den ſogenannten Kalkſpath, der in ſeiner reinſten Form vollkommen durchſichtig und farblos erſcheint, aus kohlenſaurem Kalke beſteht und die Eigenſchaft der doppelten Brechung der Lichtſtrahlen in vollkommenſtem Grade zeigt. Die ſchönſten Exemplare dieſes Minerals hat man bisher auf der Inſel Island gefunden und bezeichnet ſie aus dieſem Grunde und wegen der erwähnten optiſchen Eigenſchaft als Isländiſchen Doppelſpath (Fig. 245).

Fig. 245. Bruchſtück eines Doppelſpathkryſtalles.

Die Kryſtalle des Doppelſpathes laſſen ſich mit der größten Leichtigkeit nach den Richtungen der Grenzflächen des Rhomboëders ſpalten, wodurch man Bruchſtücke von ſtreng regelmäßiger Form darſtellen kann, welche ſich für das Studium der optiſchen Eigenſchaften des Minerales beſſer eignen. Ein ſolches Bruchſtück wird von ſechs gleichen Rhomben begrenzt, deren ſtumpfe Winkel 101° 55′ betragen: die Flächen ſtoßen in acht körper-

Fig. 246. Doppelte Bilder von Gegenſtänden, die man durch einen Kalkſpathkryſtall betrachtet.

lichen Ecken zuſammen, und zwar werden ſechs Ecken durch je zwei ſpitze und einen ſtumpfen Winkel gebildet, während an den beiden letzten Ecken nur ſtumpfe Winkel liegen. Denkt man ſich dieſe beiden Ecken durch eine gerade Linie verbunden, ſo nennt man dieſelbe, welche für die optiſchen Erſcheinungen, mit denen wir uns beſchäftigen, von der größten Bedeutung iſt, die optiſche Axe des Kryſtalles.

Digitized by Google

Mit einem solchen Bruchstücke von Kalkspath lassen sich die Versuche, durch welche Bartholinus überrascht wurde, leicht wiederholen. Legt man dasselbe auf eine Schrift, so erscheint jeder Buchstabe unter ihm doppelt (Fig. 246): jedes einzelne dieser beiden Bilder erscheint aber weniger tief geschwärzt, als die Schrift auf dem Papier, sondern nimmt eine graue Färbung an; der Grund hierfür ist nicht, wie man meinen könnte, in der Absorption des Lichtes im Krystalle zu suchen, denn da, wo beide Bilder über einander fallen, zeigt sich wieder die volle, tiefe Schwärze. Auch die Kanten des Krystalls selbst, die man durch ihn hindurch sieht, erscheinen doppelt, ebenso wie sich eine Linie auf dem Papiere in zwei Parallellinien spaltet. Läßt man einfaches Sonnenlicht auf die eine Fläche fallen, so tritt dasselbe als doppelter Strahl aus, sodaß auf einem Schirme hinter dem Krystalle zwei helle Flecke sichtbar werden, deren Abstand von dem Neigungswinkel abhängt, unter dem das Licht auf die Grenzfläche auffiel. Legt man ein Kalkspathrhomboëder auf Papier, auf dem nur ein einziger Punkt verzeichnet ist, so sieht man zwei Bilder dieses Punktes; dreht man nun den Krystall auf dem Papiere, so behält das eine Bild seine Lage bei, das andere beschreibt aber um das erstere einen vollen Kreis, während der Krystall eine volle Umdrehung macht. Stellt man denselben Versuch mit einer geraden Linie an, die auf dem Papiere verzeichnet ist, so scheint sich das eine Bild während der Drehung nur parallel zum andern Bilde hin und her zu verschieben; bei zwei entgegengesetzten Lagen des Krystalles haben beide Bilder ihren größten Abstand, bei zwei anderen Lagen, welche mitten zwischen jene Lagen fallen, scheinen sie übereinander zu liegen. Diese Deckung ist aber nur eine scheinbare; denn, markirt man einen Punkt auf der Linie, so sieht man, daß auch bei der letzteren Lage des Krystalles dieser Punkt zwei Bilder giebt, die nun beide in die Richtung der Linie fallen; das eine Bild der Linie ist also gegen das andere in seiner eigenen Richtung verschoben, und jeder einzelne Punkt des einen Bildes beschreibt auch jetzt wieder einen Kreis um den entsprechenden Punkt des anderen Bildes.

Die beiden Bilder, welche in dieser Weise entstehen, unterscheidet man dadurch, daß man das Bild, welches bei der Drehung seine Lage nicht ändert, das ordinäre, das bewegliche dagegen das extraordinäre nennt; und in gleicher Weise spricht man von ordinären und extraordinären Strahlen, von denen die ersteren nach den Brechungs-

Digitized by Google

gesetzen abgelenkt werden, die wir im vierten Kapitel dieses Buches entwickelt haben, während für die anderen die Brechung so erfolgt, daß weder der einfallende und der gebrochene Strahl mit dem Einfallslothe immer in einer Ebene liegen, noch auch das Verhältniß der Sinus der beiden Winkel ein constantes ist. Trifft ein Lichtstrahl senkrecht auf die eine Fläche des Krystalles, so wird er bei seinem Eintritte in einen ordinären und einen extraordinären Strahl zerlegt: ersterer geht ungebrochen weiter und tritt ebenso wieder ungebrochen durch die gegenüberliegenden Parallelfläche; letzterer dagegen wird trotz des senkrechten Auftreffens sowohl beim Eintritte, als auch beim Austritte aus seiner Richtung abgelenkt, jedoch so, daß die Richtung beim Austritte der ursprünglichen Richtung wieder parallel ist. Ist dagegen die Richtung des Strahles schräg zur Fläche des Krystalles, so werden beide Strahlen gebrochen; allein, während der ordinäre Strahl in gleichem Grade gebrochen wird, von welcher Seite auch das Licht kommen mag, wenn nur der Einfallswinkel von bestimmter Größe ist, während also die Erscheinung für ihn nicht wesentlich anders ist, als der Vorgang beim Durchgange des Lichtes durch ein Stück Glas: so ist dies durchaus nicht der Fall für den extraordinären Strahl, welcher sich, wie erwähnt, um den ordinären Strahl herumdreht, sobald der Krystall in der Richtung der Fläche, durch welche das Licht eindringt, gedreht wird.

Legt man ein Kalkspathrhomboëder auf ein Blatt Papier, auf welchem ein Punkt markirt ist, so wird, wo man sich auch aufstellt, das ordinäre Bild O immer in einer Ebene liegen, welche auf den beiden brechenden Flächen des Krystalles senkrecht steht, und sowohl durch den Punkt, als auch durch unser Auge gelegt ist, weil bei der gewöhnlichen Strahlenbrechung, der ja der ordinäre Strahl folgt, der einfallende und der gebrochene Strahl mit dem Einfallslothe in eine Ebene fallen. Bezeichnet man den Durchschnitt dieser Ebene, die man Einfallsebene nennt, mit der Ebene des Papieres durch II, so liegt das ordinäre Bild O des Punktes auf II (Fig. 247); nicht so

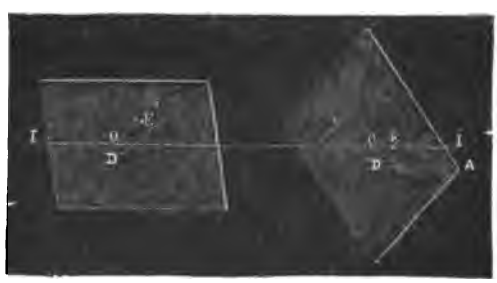


Fig. 247. Lage des extraordinären Bildes zur Einfallsebene. Hauptschnitt.

Digitized by Google

das extraordinäre Bild E, da der extraordinäre Strahl dem gewöhnlichen Brechungsgesetze nicht folgt: die Verbreitungslinie OE bildet daher mit II einen Winkel. Dreht man nun den Krystall, so ändert sich auch die Richtung von OE, man sieht aber leicht, daß in jeder Lage diese Linie der Halbirungslinie AD des stumpfen Winkels bei A parallel ist: fällt daher diese Halbirungslinie in die Richtung II, so wird sich in diesem

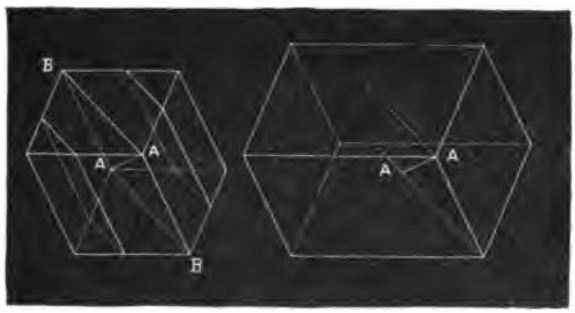


Fig. 248. Hauptschnitt und optische Axe des Doppelspathes.

speciellen Falle auch das extraordinäre Bild auf II befinden, beide Bilder liegen also dann in der Einfallsebene.

Unter allen Ebenen, die durch einen Punkt der Fläche eines Kalkspathkrystalles senkrecht zu dieser Fläche gelegt werden können, giebt es also eine, aus welcher auch der extraordinäre Strahl nicht heraustritt, und die deshalb Hauptschnitt heißt. Jeder Hauptschnitt ist parallel der kleinen Diagonale des Rhombus, der den Krystall begrenzt, oder der Halbirungslinie des stumpfen Winkels in diesem Rhombus, und ebenso ist er der optischen Axe AA′ des Krystalles parallel (Fig. 248): ja letztere Bedingung genügt schon an und für sich und man kann sagen, daß jede Ebene, welche der optischen Axe parallel ist, ein Hauptschnitt ist. Schleift man an den Krystall eine Fläche ABC an, welche auf der optischen Axe NI senkrecht steht (Fig. 249), so wird sich jeder Strahl, welcher diese Fläche trifft nothwendig in einem Hauptschnitte bewegen, beide gebrochenen Strahlen bleiben daher in der Einfallsebene: ist die Richtung des einfallenden

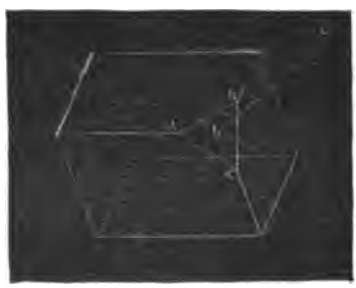


Fig. 249. Künstlicher Schnitt senkrecht zur optischen Axe.

Digitized by Google

Strahles außerdem noch senkrecht zu dieser künstlich angeschliffenen Ebene, so geht das Licht ungebrochen in das Innere des Krystalls hinein. Es giebt also eine Richtung im Krystalle, in welcher eine Doppelbrechung nicht stattfindet, und das ist die Richtung der optischen Axe.

Welchen Weg die beiden Strahlen im Kalkspath einschlagen, läßt sich aus einem Versuche erkennen, den zuerst Monge anstellte, der sich aber sehr leicht wiederholen läßt. Geht von einem Punkte S (Fig. 250), der in einiger Entfernung hinter einem Kalkspathkrystalle liegt, Licht aus, so sieht man die beiden Bilder dieses Punktes in O und E*). Schiebt man nun einen undurchsichtigen Körper ab, z. B. ein Kartenblatt, hinter den Krystall, so bemerkt man die eigenthümliche Erscheinung, daß das Bild E, welches von dem Körper ab weiter absteht, zuerst verschwindet, und nach ihm erst das näher gelegene Bild O. Der Grund hierfür läßt sich aber leicht erkennen: geht ein Lichtstrahl SI von S aus, so theilt sich derselbe in dem Punkte I, wo er in den Krystall eindringt, in zwei Theile, einen ordinären, welcher beim Kalkspath stärker, und einen extraordinären, welcher schwächer gebrochen wird. Da beide divergiren, so können sie nicht zugleich in unser Auge gelangen, wenn dasselbe eine bestimmte Stellung einnimmt. Nehmen wir an, ein gewisses Strahlenbündel sende unserem Auge den extraordinären Strahl zu, so wird das Bündel, von welchem wir gleichzeitig den ordinären Strahl erhalten sollen, den Krystall steiler durchlaufen müssen, was nur möglich ist, wenn sich beide Strahlen innerhalb des Krystalles

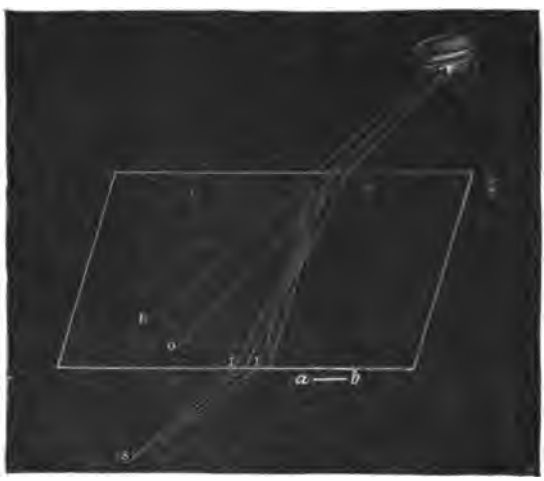


Fig. 250. Kreuzung des ordinären und des extraordinären Strahles.

*) Durch ein Versehen des Zeichners sind hier die Buchstaben O und E verwechselt: es bedeutet also in Fig. 250 O das extraordinäre, E das ordinäre Bild, wenn wir Kalkspath als brechenden Körper anwenden; hätte man einen Bergkrystall benutzt, so würde die Bezeichnung richtig sein.

Digitized by Google

durchkreuzen. Wird nun die Karte ab vorgeschoben, so durchschneidet dieselbe zuerst das Strahlenbündel, welches uns die ordinären Strahlen sendet, und damit verschwindet zuerst das ordinäre Bild E.

Wir haben bereits erwähnt, daß der ordinäre Strahl den Gesetzen der einfachen Brechung folgt: er bleibt immer in derselben Einfallsebene, die im Einfallspunkte auf der Fläche des Krystalles senkrecht steht, und das Verhältniß der Sinus des Einfalls- und Brechungswinkel oder der Brechungsexponent ist für ihn immer von constanter Größe. Der extraordinäre Strahl dagegen verläßt die Einfallsebene, ausgenommen wenn dieselbe mit einem Hauptschnitte zusammenfällt, und für ihn ändert sich das Brechungsverhältniß je nach dem Winkel, den er mit der optischen Axe einschließt. Nur, wenn ein Strahl in der Richtung der optischen Axe den Krystall durchwandert, legen der ordinäre und der extraordinäre Strahl ihren Weg gemeinsam zurück, und dann ist auch der Brechungsexponent für beide derselbe, in jedem anderen Falle aber haben beide verschiedene Brechungsexponenten. Wird nun der extraordinäre Strahl stärker gebrochen, als der ordinäre, so nennt man den Krystall einen optisch positiven, im entgegengesetzten Falle einen optisch negativen Körper doppelter Brechung. Für die positiven Körper ist der Hauptrepräsentant der Bergkrystall (Fig. 251), außer ihm gehört hierher aber noch unter anderen Eisenoxyd, Zinnstein, Zirkon, Eis; negative Ablenkung zeigt sich am besten beim Kalkspath, dann aber auch beim Turmalin, Rubin, Smaragd, Glimmer u. a.

Fig. 251. Bergkrystall.

Während es im Kalkspath und Bergkrystall nur eine Richtung giebt, in welcher die doppelte Brechung verschwindet, und welche man als Richtung der optischen Axe bezeichnet, hat man eine große Anzahl anderer Krystalle aufgefunden, welche zwei optische Axen, d. h. zwei Richtungen, in denen die Brechung einfach ist, besitzen: man bezeichnet dieselben als optisch zweiaxige, die zuvor besprochenen aber als optisch einaxige Krystalle. Untersucht man die Brechung der beiden Strahlen in den optisch zweiaxigen Krystallen, so findet man, daß keiner derselben

Digitized by Google

den einfachen Brechungsgesetzen folgt; es ist also keiner ein ordinärer Strahl, sondern beide sind als extraordinäre Strahlen anzusehen. Zu diesen Körpern gehören Topas, Aragonit, Gips, Talk, Feldspath, ferner auch Zucker und die Perlen. Zum Beweise, daß diese Körper keine ordinären Strahlen geben, kittete Fresnel eine Anzahl Bruchstücke von Topaskrystallen mit ihren ebenen Flächen so zusammen, daß das Ganze die Form eines Parallelepipedon erhielt und legte dieses Stäbchen auf ein Papier, auf welches er eine Linie gezogen hatte. Würde nun der eine der beiden Strahlen in gewöhnlicher Weise gebrochen, so müßte das eine Bild der Linie wieder als gerade Linie erscheinen: dies war aber nicht der Fall; beide Bilder erschienen als gebrochene Linien, woraus folgt, daß beide Strahlen extraordinäre Strahlen waren. Wir werden bald ein anderes, bequemeres Mittel kennen lernen, durch welches sich die ein- und zweiaxigen Krystalle unterscheiden lassen.

Unter denjenigen Mitteln, welche das Licht nicht doppelt sondern nur einfach brechen, erwähnen wir die Gase, Dämpfe und Flüssigkeiten; ferner diejenigen Körper, die durch Erstarren, ohne dabei zu krystallisiren, aus dem flüssigen in den festen Zustand übergegangen sind, wie Glas, Leim, Gummi und Harze; endlich diejenigen Krystalle, deren Formen dem regulären Systeme angehören. Unter den letzteren ist besonders der Diamant zu erwähnen: denn für diesen werthvollsten aller Steine ist die einfache Brechung des Lichtes ein sehr wichtiges Erkennungszeichen, welches angewendet werden kann, ohne daß der Stein dadurch irgend welchen Schaden erleide. Doch auch bei den zuletzt erwähnten Körpern zeigt sich doppelte Brechung, wenn sie einem starken Drucke unterworfen oder einseitig erwärmt werden. Auch das Reich der organischen Natur liefert doppeltbrechende Stoffe, wie das Horn, die Federn und die Perlmutter.

§ 2. Polarisation des Lichtes durch doppelte Brechung.

Die doppelte Brechung des Lichtes durch einen Krystall läßt sich auch dadurch anschaulich machen, daß man in ein dunkles Zimmer durch den Laden einen Sonnenstrahl eindringen läßt und denselben durch ein Kalkspathrhomboëder auffängt. Die austretenden Strahlen sammelt man durch eine Linse, welche auf einem dahinter befindlichen Schirme zwei deutliche Bilder der Sonne entstehen läßt (Fig. 252), von denen

Digitized by Google

das eine durch die ordinären, das andere durch die extraordinären Strahlen erzeugt wird. Dreht man nun den Krystall parallel zu der Fläche, durch welche das Licht eindringt, so bewegt sich jedes Bild in einem Kreise um die Axe: in jeder Stellung sind aber beide Bilder von gleicher Lichtstärke. Richtet man es noch so ein, daß beide Bilder zum Theil

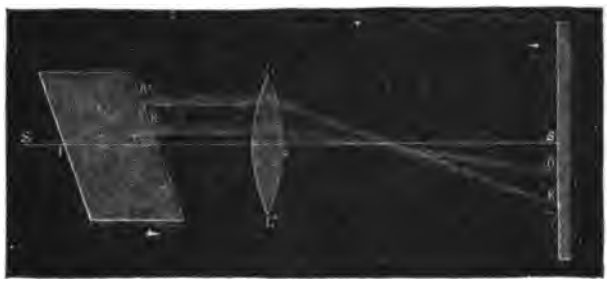


Fig. 252. Darstellung des ordinären und extraordinären Bildes auf einem Schirme.

auf einander fallen, so ist die Helligkeit des gemeinsamen Stückes doppelt so groß, als die Helligkeit jedes Theiles, der nur einem der Bilder angehört (Fig. 253).

Gleichwohl läßt sich zeigen, daß das Licht in den beiden Strahlen nach dem Durchgang durch den Krystall neue und bemerkenswerthe Eigenschaften angenommen hat, die es vorher nicht besaß, und daß sich die beiden Strahlen wesentlich von einander unterscheiden. Diese Eigenschaften machen sich bemerklich, wenn man sowohl den ordinären, als auch den extraordinären Strahl durch einen zweiten Krystall hindurch gehen läßt, ein Verfahren, das Huyghens zuerst anwendete, um die Lichtstärke beider Strahlen genauer zu prüfen.

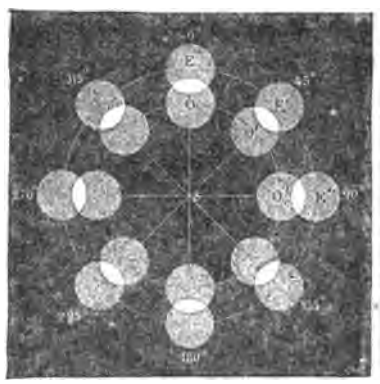


Fig. 253. Gleichheit der Lichtstärke des ordinären und des extraordinären Bildes bei der doppelten Brechung.

Man sieht bei Anwendung dieses Verfahrens nämlich, daß unter Umständen das eine Bild ganz ausgelöscht werden kann, wie wir jetzt ausführlicher besprechen wollen.

Legt man einen Kalkspathkrystall auf ein Papier, auf welchem sich ein schwarzer Punkt befindet, so sieht man diesen Punkt doppelt und

Digitized by Google

beide Bilder sind gleich intensiv. Legt man nun auf den ersten Krystall einen zweiten so, daß sein Hauptschnitt mit dem Hauptschnitte des ersten zusammenfällt, was leicht dadurch erreicht wird, daß seine Kanten den Kanten des ersten parallel genommen werden, so wird man auch jetzt nur zwei Bilder von gleicher Lichtstärke sehen, die nur weiter von einander abstehen als zuvor. Man braucht hierbei die Flächen der beiden Krystalle gar nicht auf einander zu legen, man kann den zweiten Krystall gegen den ersten etwas neigen: das einzige Erforderniß ist nur, daß sich seine Hauptschnitte mit den Hauptschnitten des ersten in paralleler Lage befinden. Dieser Versuch zeigt, daß ein Strahl, der schon durch einen

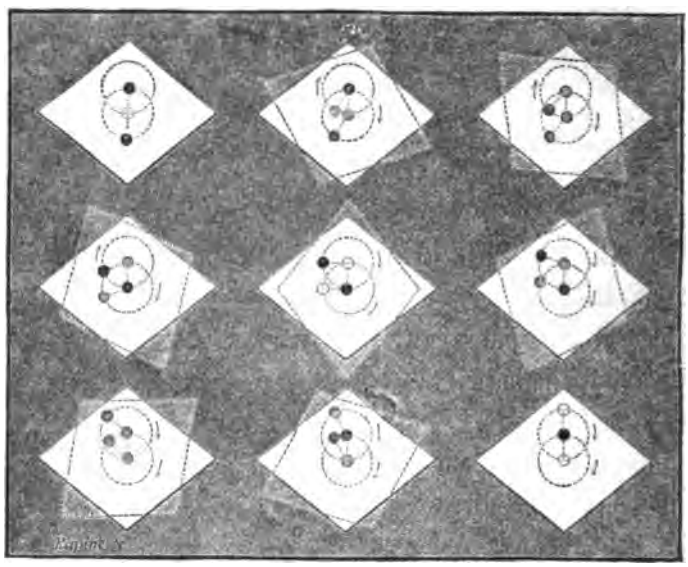


Fig. 254. Aenderung der Intensität der Bilder zweier polarisirter Strahlenbündel bei doppelter Brechung.

Krystall gegangen ist, durch einen zweiten Krystall in gleicher Lage nicht von Neuem in zwei Strahlen zerlegt wird.

Fängt man nun an, den oberen Krystall langsam weiter zu drehen, sodaß sein Hauptschnitt mit dem Hauptschnitte des ersten einen Winkel bildet, so erscheinen plötzlich vier Bilder: sowohl der ordinäre, als auch der extraordinäre Strahl des ersten Krystalles ist in zwei Strahlen aufgelöst: die Intensität dieser Strahlen ist aber im Allgemeinen nicht mehr dieselbe. Von den vier Bildern, die sich also nunmehr zeigen, und die die Ecken eines Rhombus einnehmen, entstehen also zwei dadurch, daß der ordinäre Strahl, die bei andern dadurch, daß der extraordinäre

Digitized by Google

Strahl des unteren Krystalles in je zwei Strahlen wieder gespalten wird, deren Intensität aber verschieden ist. In Fig. 254 ist die Lage und Intensität der vier Punkte dargestellt, wenn der Winkel, den die Hauptschnitte beider Krystalle bilden, von 0° bis 180° wächst. Beträgt dieser Winkel 90°, so sind zwei der Bilder vollständig verschwunden; ebenso verschwinden die beiden anderen Bilder, wenn der Winkel 180° beträgt: sind in diesem Falle die beiden Krystalle gleich dick, so wird die Ablenkung, welche von dem einen hervorgebracht wird, durch den anderen wieder vollständig aufgehoben, sodaß beide Bilder in einen Punkt zusammenfallen und uns nur wie ein einziges Bild erscheinen.

Schon aus diesem ersten Versuche geht hervor, daß jeder Lichtstrahl, welcher durch einen doppeltbrechenden Krystall gegangen ist, nicht mehr nach allen Seiten hin dieselben Eigenschaften besitzt: nach gewissen Rich-

Fig. 255. Polarisirung der Lichtstrahlen durch doppelte Brechung.

tungen hin läßt er sich nicht mehr in zwei Strahlen spalten, nach anderen Richtungen sind die Strahlen, in welche er gespalten wird nicht von gleicher Lichtstärke. Um diese Eigenthümlichkeit zu bezeichnen, sagt man, daß die Strahlen, die aus einem doppeltbrechenden Krystall hervortreten, aus *polarisirtem Lichte* bestehen.

Noch besser läßt sich die Verschiedenheit der Strahlen durch folgenden Versuch nachweisen. Fängt man wieder in einem dunklen Zimmer einen Sonnenstrahl SI (Fig. 255) durch einen Kalkspathkrystall auf, so wird derselbe in den ordinären IR' und den extraordinären IR zerlegt. Fängt man nun diese Strahlen auf einem Schirme auf, in welchem sich eine Oeffnung befindet und stellt man die Oeffnung so ein, daß nur der eine von beiden Strahlen z. B. der extraordinäre durch sie hindurch kann, so kann man nunmehr weiter untersuchen, in welcher Weise dieser Strahl durch einen zweiten Kalkspathkrystall, der sich hinter dem Schirme befindet,

Digitized by Google

gebrochen wird. Man wird auch in diesem Falle die austretenden Strahlen durch eine Linse auffangen und das durch dieselbe entstehende Bild auf einen Schirm werfen. Stellt man nun zunächst den zweiten Krystall so ein, daß sein Hauptschnitt dem Hauptschnitte des ersten Krystalles parallel ist, so sieht man auf dem Schirme nur einen einzigen hellen Fleck; dreht man den zweiten Krystall weiter, so erscheint neben dem ersten Fleck ein zweiter, der bei fortgesetzter Bewegung an Lichtstärke zunimmt, während die Intensität des ersten Fleckes immer mehr abnimmt, bis derselbe endlich ganz verschwunden ist, wenn die Hauptschnitte senkrecht auf einander sind, in diesem Falle hat der zweite helle Fleck seine volle Lichtstärke erlangt. Denselben Versuch kann man nun auch mit dem ordinären Strahle anstellen, was zu ganz ähnlichen Resultaten führt:

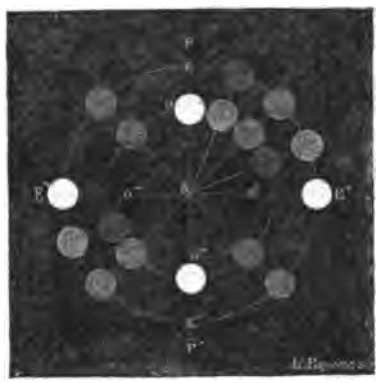


Fig. 256. Verdoppelung des ordinären Strahles.

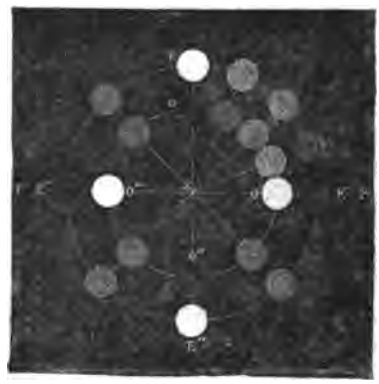


Fig. 257. Verdoppelung des extraordinären Strahles.

der Wechsel der Intensität beider Flecke ist aber aus Fig. 256 und 257 deutlich zu erkennen.

Fassen wir das Gesagte noch einmal zusammen, so sind wir zu folgenden Resultaten gelangt: tritt ein Bündel aus gewöhnlichem Sonnenlichte in einen Kalkspathkrystall, so erleidet es in demselben eine doppelte Brechung und die beiden austretenden Strahlen haben gewisse Eigenthümlichkeiten, die man dadurch andeutet, daß man sagt, sie sind *polarisirt*; aus diesem Grunde heißt der erste Krystall der *Polarisator*. Die Eigenthümlichkeiten, die jeder dieser Strahlen besitzt, zeigen sich, wenn man ihn durch einen zweiten Krystall von Neuem doppelt brechen läßt: dieser zweite Krystall analysirt gleichsam das Licht jedes Strahles und heißt daher *Analysator*. Geht also z. B. der ordinäre Strahl in den Analysator über, so giebt er durch denselben wieder zwei Bilder,

Digitized by Google

ein ordinäres und ein extraordinäres, deren Intensität sich nach dem Winkel ändert, den die Hauptschnitte beider Krystalle mit einander einschließen. Beträgt dieser Winkel 0° oder 180° so hat das ordinäre Bild seine größte Helligkeit, das extraordinäre ist verschwunden: umgekehrt verschwindet das ordinäre und erhält das extraordinäre seine größte Intensität bei einem Winkel von 90°; bei 45° haben beide Bilder gleiche Intensität, in allen anderen Stellungen ist aber das eine heller als das andere, je nachdem sich der Winkel mehr 0° oder 90° nähert. Der ordinäre Strahl des Polarisators geht also als ordinärer Strahl in voller Intensität durch den Analysator, wenn die Hauptschnitte beider Krystalle in eine Ebene fallen: deshalb sagen wir, daß der ordinäre Strahl nach der Ebene des Hauptschnittes polarisirt ist und nennen diese Ebene seine Polarisationsebene. Dagegen geht der extraordinäre Strahl als ordinärer Strahl durch den Analysator, wenn derselbe um 90° weiter gedreht ist: die Polarisationsebene des extraordinären Strahles ist also auf dem Hauptschnitte senkrecht. Geht daher ein Lichtstrahl durch einen doppeltbrechenden Krystall, so wird er in zwei Strahlen getheilt, die rechtwinklig zu einander polarisirt sind.

In derselben Weise, wie beim Kalkspathe, erfolgt die Brechung und Polarisation bei allen doppeltbrechenden Krystallen; doch ist es nicht immer leicht, diese Erscheinung zu beobachten, da sich die Strahlen oft nur wenig von einander entfernen, und auch beim Kalkspath selbst muß man Krystalle von einiger Dicke anwenden, damit man den einen Strahl durch einen Schirm leicht abblenden kann. Um daher den einen der Strahlen leichter isolirt zu erhalten, hat man verschiedene Mittel ersonnen, unter denen das Nicol'sche Prisma besonders wichtig ist. Man schneidet einen Doppelspathkrystall längs einer Diagonalebene, die auf dem Hauptschnitte senkrecht steht, in zwei Theile und befestigt diese Theile wieder an einander, indem man zwischen sie eine dünne Schicht Canadabalsam bringt. Der Brechungsexponent dieses Stoffes liegt zwischen dem Brechungsexponenten für den ordinären und den extraordinären Strahl im Kalkspath: dringt ein Lichtstrahl in der Längsrichtung in den Kalkspath und trifft derselbe in sehr schräger Richtung auf die Schicht des Canadabalsam, so erleidet der ordinäre Strahl totale Reflexion, während der extraordinäre Strahl allein in den anderen Theil des Krystalles hinüber und durch denselben in die Luft dringt. Nimmt man mithin als Pola-

Digitized by Google

risator ein Nicol'sches Prisma, so tritt aus demselben nur der extraordinäre Strahl aus: läßt man denselben nun durch ein zweites Prisma gehen, so wird er frei hindurchgelassen, wenn sich beide Prismen in paralleler Stellung befinden, oder wenn das zweite gegen das erste um 180° gedreht ist; beträgt der Drehungswinkel dagegen 90°, so wird der Strahl vollständig absorbirt und das ganze Gesichtsfeld erscheint dunkel.

Dieselbe Eigenthümlichkeit, wie das Nicol'sche Prisma, besitzt auch ein Edelstein, der Turmalin (Fig. 258): auch dieser Körper absorbirt bei gewisser Dicke, wie Biot zuerst im Jahre 1815 bemerkte, sehr stark die ordinären Strahlen, sodaß durch ihn nur die extraordinären Lichtstrahlen hindurchgelangen. „Theilt man einen Turmalinkrystall," sagt J. Herschel in seinem Werke über das Licht, „mittels eines Steinschleiferrades in Platten, welche mit der Axe des Krystalles parallel und etwa ein Zwanzigstel Zoll (1,27 mm) stark sind, und polirt man sorgfältig die Flächen, so sieht man durch diese Platten die leuchtenden Gegenstände ebenso, als wenn man sie durch ein farbiges Glas erblickte.

Fig. 258. Sibirischer Turmalin.

Hält man eine solche Platte zwischen das Auge und eine Flamme, so kann man diese mit gleicher Leichtigkeit bei allen Stellungen der Axe des Krystalles zum Horizonte sehen: dreht man die Platte in ihrer eigenen Ebene, so bemerkt man durchaus keine Aenderung in der Lichtstärke der Flamme. Giebt man nun der ersten Platte eine feste Stellung, indem man z. B. ihre Axe aufrecht stellt, und bringt man zwischen sie und das Auge noch eine zweite Platte, die man langsam in ihrer Ebene weiter dreht, so wird die Flamme abwechselnd sichtbar und unsichtbar. Beginnt man bei einer Stellung, bei welcher die Helligkeit der Flamme am größten ist, und dreht man weiter, so nimmt die Lichtstärke allmählich ab, und es tritt vollständige oder wenigstens fast vollständige Dunkelheit ein, wenn der Drehungswinkel 90° beträgt: von dieser Stellung aus nimmt das Licht in derselben Weise bis zu 180° wieder zu, wie es vorher abgenommen hat. Achtet man hierbei auf die gegenseitige Lage der Axen

Digitized by Google

in beiden Platten, so findet man, daß die Maxima der Helligkeit eintreten, wenn die Axen parallel sind, wenn also die Platten dieselbe gegenseitige Lage haben, wie im vollständigen Krystalle, oder wenn sie um 180° gegen einander gedreht sind: die Minima aber treten ein, wenn sie sich rechtwinklig schneiden. In dieser letzteren Stellung wird das Licht vollständig absorbirt, wenn der Turmalin von sehr reiner Farbe ist; und wenn dann auch jede einzelne Platte vollkommen durchsichtig ist, so werden beide, wenn sie mit einander vereinigt sind, doch vollständig undurchsichtig."

Also auch in diesem Falle zeigt sich das Licht, wenn es die erste Turmalinplatte durchdrungen hat, polarisirt, wie beim Kalkspathe: es zeigt nicht mehr nach allen Seiten hin dieselben Eigenschaften und kann nicht mehr eine zweite Turmalinplatte in gleicher Weise durchdringen. Doch nicht die doppelte Brechung allein verwandelt das gewöhnliche Licht in polarisirtes Licht, sondern wir werden jetzt noch ein zweites Mittel kennen lernen, durch welches diese Umwandelung herbeigeführt wird.

Im Jahre 1808 betrachtete zufällig der Physiker Malus durch einen Doppelspathkrystall das Bild der untergehenden Sonne, das sich in den Fenstern des Palais Luxembourg spiegelte, und bemerkte, daß beim Drehen des Krystalles die beiden Bilder ihre Lichtstärke änderten: bald hatte das eine seinen größten Glanz, während das andere nur matt war, dann aber kehrte sich das Verhältniß um, wenn er den Krystall um 90° weiter drehte. Als er nun diese Erscheinung weiter untersuchte, so kam er zu der Ueberzeugung, daß auch die Reflexion unter gewissen Winkeln genügt, um den Lichtstrahlen dieselben Eigenschaften zu ertheilen, die ein Strahl besitzt, der durch einen doppeltbrechenden Krystall, wie z. B. durch Kalkspath, gegangen ist. Der Versuch, den Huygheus angestellt hatte, und für den sich sowohl der Entdecker, wie auch Newton, vergeblich um eine Erklärung bemüht hatten, stand nun nicht mehr vereinzelt da, sondern ähnliche Erscheinungen zeigten sich nunmehr bei ganz anderen Bedingungen. So wie Newton versucht hatte, die Farben dünner Platten aus der Emissionstheorie zu erklären, so deutete auch Malus die von ihm beobachtete Erscheinung dadurch, daß er annahm, daß die Lichtmolecüle in zwei verschiedene, einander entgegengesetzte, Zustände versetzt werden könnten, und wählte zur Bezeichnung dieser Zustände den noch jetzt gebräuchlichen Ausdruck, daß er sie als polarisirtes Licht bezeichnete. Drei Jahre

Digitized by Google

später fanden Malus, Biot und Brewster gleichzeitig und unabhängig von einander, daß auch bei der einfachen Strahlenbrechung das Licht, wenn auch in geringerem Grade, polarisirt wird, und in derselben Zeit fand Arago die farbige Polarisation: seitdem sind in diesem Theile der Physik noch eine große Menge neuer Thatsachen entdeckt worden, die ebenso wichtig für die Entwickelung der Theorie, als nutzbar für die praktische Anwendung sind: allein wegen des elementaren Charakters, der diesem Buche durchaus erhalten werden soll, ist es uns nur möglich, einige der merkwürdigsten dieser Erscheinungen noch zu besprechen.

§ 3. Polarisation durch Reflexion.

Fällt ein Strahl gewöhnlichen Lichtes unter einem bestimmten Winkel auf eine nicht metallische spiegelnde Fläche, z. B. auf nicht belegtes Glas, Marmor, Obsidian, so wird er bei der Reflexion in denselben Zustand versetzt, als ob er durch einen doppelt brechenden Krystall hindurchgegangen wäre: er ist polarisirt. Legt man an das offene Fenster ein Stück schwarzes Glas und stellt man sich so auf, daß die Lichtstrahlen, welche von den Wolken ausgehen und vom Spiegel reflectirt werden, unter einem Winkel von $35^0\ 25'$ gegen die Spiegelfläche zurückgeworfen werden, ehe sie in unser Auge gelangen, so wird uns die ganze spiegelnde Fläche erleuchtet erscheinen. Hält man nun, ohne seinen Standpunkt zu ändern, vor das Auge eine Turmalinplatte, die parallel zur Axe geschnitten ist, und dreht man dieselbe weiter, so wird man sehr merkwürdige Wandelungen in der Erleuchtung der Spiegelplatte wahrnehmen. Steht zunächst die Axe des Turmalinkrystalles aufrecht, so verschwindet das Licht, das uns der Spiegel sendet: die Glasplatte erscheint wie mit einer Art Wolke bedeckt, und die Mitte dieses dunklen Fleckes erscheint vollständig schwarz; liegt die Axe dagegen horizontal, ist sie also der Spiegelfläche parallel, so verschwindet dieser Fleck und das Bild des Himmels ist ungetrübt zu sehen. In den mittleren Lagen geht der eine Zustand allmählich in den anderen über. Dieselbe Erscheinung zeigt sich, wenn man an Stelle der Turmalinplatte ein Nicol'sches Prisma anwendet: auch hier Dunkelheit, wenn der Hauptschnitt senkrecht zur Spiegelfläche liegt, Helligkeit, wenn das Prisma um 90^0 weiter gedreht ist.

Dieser Versuch zeigt, daß, wenn ein Lichtstrahl auf eine Glasplatte

Digitized by Google

unter einem Neigungswinkel von 35° 25′ oder unter einem Einfallswinkel gegen das Loth von 54° 35′ auftrifft, das reflectirte Licht polarisirt ist, und zwar fällt die Polarisationsebene mit der Reflexionsebene zusammen. Der Winkel von 54° 35′, den der einfallende Strahl mit dem Einfallslothe bilden muß, wenn der zurückgeworfene Strahl vom Analysator bei geeigneter Stellung vollständig absorbirt werden soll, wenn mit anderen Worten das Licht vollständig polarisirt ist, heißt der Polarisationswinkel des Glases. Trifft der Strahl unter einem anderen

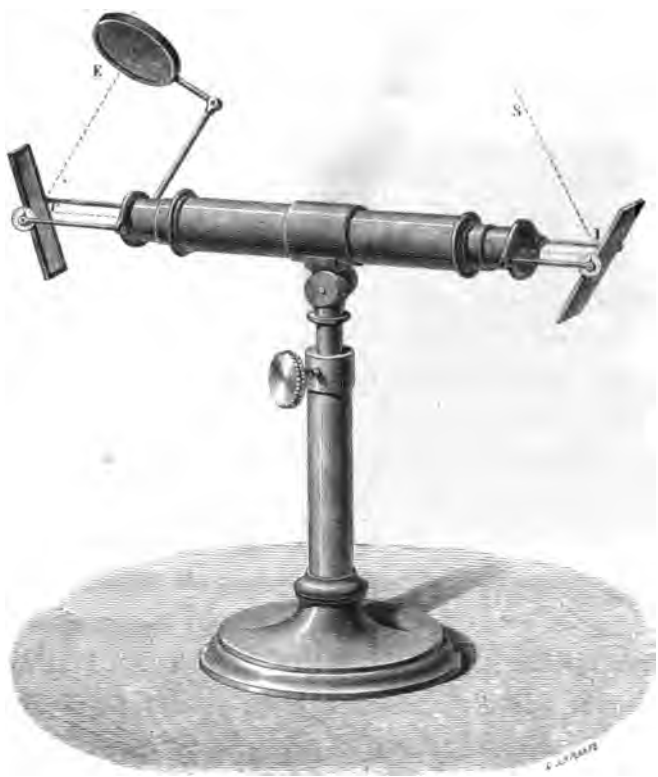


Fig. 259. Polarisationsapparat nach Malus, verbessert durch Biot.

Winkel auf die spiegelnde Fläche, so ist die Polarisation unvollständig: das Licht im Analysator wird dann matt, ohne jedoch vollständig zu verschwinden.

Für andere spiegelnde Körper hat der Polarisationswinkel andere Größe: so beträgt er für Wasser 52° 45′, für Obsidian 56° 3′, für Topas 58° 40′ und für Diamant 68° 2′. Daß für verschiedene Substanzen, z. B. für Glas und Wasser der Polarisationswinkel verschiedene

Digitized by Google

Größe hat, davon kann man sich durch einen sehr einfachen, von Brewster herrührenden Versuch überzeugen. Stellt man sich so auf, daß man das Licht von einer Glastafel unter einem Reflexionswinkel von 54° 35′ erhält, und bringt man vor die Augen einen Analysator in solche Stellung, daß das Gesichtsfeld dunkel erscheint, so wird sofort ein schwaches Bild entstehen, sobald Jemand gegen die Glastafel haucht: an Stelle des Glasspiegels ist nunmehr ein Wasserspiegel getreten, der einen anderen Polarisationswinkel besitzt, sodaß die unter dem Reflexionswinkel von 54° 35′ zurückgeworfenen Strahlen nicht mehr vollständig polarisirt sind.

Um die Eigenschaften des durch Reflexion polarisirten Lichtes bequem studiren zu können, hat Malus den in Fig. 259 abgebildeten, von Biot verbesserten Polarisationsapparat construirt. Ein Sonnenstrahl SI fällt zunächst auf eine schwarze Glasplatte I, welche ihn in der Richtung I·I′ zurückwirft und zugleich polarisirt; nachdem nun der Strahl noch ein im Innern geschwärztes Rohr, das einige Blenden enthält, durchwandert hat, trifft er auf einen zweiten Spiegel I′, der ihn entweder auf einen Schirm E oder direct in unser Auge wirft. Sowohl das Rohr, als auch die Spiegel lassen sich beliebig neigen und außerdem lassen sich die Spiegel mit ihren Fassungen um die Mittellinie des Rohres drehen, sodaß es möglich ist, das Licht in jeder Richtung, wie man nur will, auf die Spiegel auffallen zu lassen. Man kann sich mit diesem Apparate leicht überzeugen, daß der größte Grad von Dunkelheit eintritt, wenn bei beiden Spiegeln die Reflexionswinkel 54° 35′ betragen, und wenn zugleich die Reflexionsebenen senkrecht zu einander sind. Behält man dieselbe Neigung der Spiegel bei, dreht man aber den zweiten Spiegel mit seiner Fassung so, daß die Reflexionsebenen zusammenfallen, so erscheint das Bild in der größten Helligkeit.

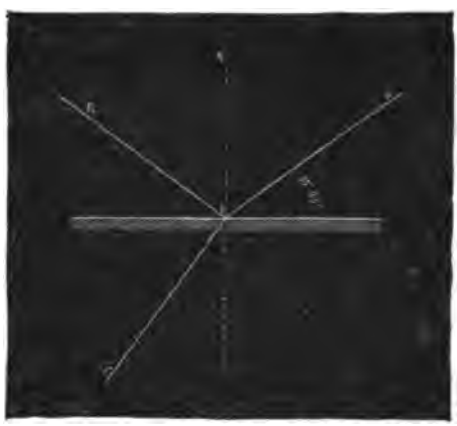


Fig. 260. Der vollständig polarisirte Strahl bildet mit dem gebrochenen Strahle einen rechten Winkel.

Digitized by Google

Brewster hat eine sehr einfache Beziehung gefunden, welche zwischen dem Polarisationswinkel einerseits und dem Brechungsexponenten der spiegelnden Substanz andererseits besteht: verfolgt man den Weg des Strahles, der so zurückgeworfen wird, daß er vollständig polarisirt ist, und den Weg des Strahles, welcher durch Refraction in das Innere des spiegelnden Körpers eindringt, so findet man, daß beide einen rechten Winkel einschließen (Fig. 260).

Auch durch die einfache Strahlenbrechung wird das Licht polarisirt, wie man mit dem Biot'schen Polarisationsapparate (Fig. 259) zeigen kann, wenn man den ersten Spiegel durch ein Glasprisma ersetzt. Dreht man das Prisma so, daß der Strahl aus der Grenzfläche unter einem Winkel von 54° 35′ gegen das Loth austritt, so findet man auch in diesem Falle, wenn man dem Analysator verschiedene Stellungen giebt, Maxima und Minima der Helligkeit, welche aber nicht so deutlich hervortreten, wie bei der Polarisation durch Reflexion, sodaß man schließen muß, daß die Polarisation nur theilweise stattfindet. Die größte Helligkeit erlangt bei diesem Versuche das Licht, wenn die Brechungsebene am Prisma und die Reflexionsebene am Spiegel senkrecht zu einander stehen, woraus sich ergiebt, daß die Polarisationsebene bei der Strahlenbrechung auf der Refractionsebene senkrecht steht. Will man das Licht durch Refraction vollständig polarisiren, so muß man es eine Reihe paralleler Glastafeln durchwandern lassen, sodaß der Strahl mit jeder Grenzfläche einen Winkel von 35° 25′ bildet. Man befestigt deshalb eine Anzahl dünner, gut polirter Tafeln parallel in einem Rohre so, daß zwischen je zwei derselben noch eine sehr dünne Luftschicht bleibt, und daß sie gegen die Axe des Rohres unter einem Winkel von 35° 25′ geneigt sind. Das Licht, das durch einen solchen Glassatz hindurchgeht, zeigt alle Eigenthümlichkeiten des durch andere Mittel polarisirten Lichtes.

§ 4. Farben des polarisirten Lichtes.

Als Arago im Jahre 1811 an einem heiteren Tage ein dünnes Glimmerblättchen mittels eines Doppelspathes untersuchte, so sah er, daß die beiden Bilder die durch den Krystall hervorgerufen wurden, nicht von gleicher Färbung waren: das eine erschien grünlichgelb, das andere purpurroth, während die Stelle, wo sie sich deckten, die Farbe zeigte,

Digitized by Google

welche der Glimmer für das unbewaffnete Auge besitzt. Dadurch, daß er das Blättchen gegen die Richtung der Strahlen ein wenig neigte, änderte sich die Farbe; stärkerer Farbenwechsel aber ergab sich, wenn er das Blättchen, ohne seine Neigung zu ändern, in seiner Ebene weiter drehte, und er fand, daß er demselben vier Stellungen geben konnte, die zu einander rechtwinkelig waren und bei denen die beiden Bilder gleich hell und durchaus farblos erschienen. Ließ er das Blättchen in seiner Stellung, drehte dagegen den Spathkrystall, so sah er, daß auch in diesem Falle jedes Bild der Reihe nach verschiedene Farben annahm und nach jeder Viertelumdrehung immer wieder vollständig weiß wurde. Endlich waren die Farben der beiden Bilder bei jeder Stellung des Blättchens und des Krystalles stets complementär, sodaß da, wo beide Bilder über einander fielen, weißes Licht entstand.

Dieser Versuch, den Arago in einer Denkschrift beschreibt, die er am 11. August 1811 in der Academie der Wissenschaften vorlas, bildete den Ausgangspunkt für eine Reihe von Entdeckungen über die Farben des polarisirten Lichtes. Zunächst erkannte er, daß das Licht, welches in das Glimmerblättchen eindrang, durch Reflexion in den Luftschichten polarisirt sein mußte; denn als er den Versuch bei bedecktem Himmel wiederholte, wenn die Wolken diffuses Licht aussenden, das sich vom gewöhnlichen Lichte nicht unterscheidet, so zeigen die beiden Bilder im Glimmerblättchen keine Spur von Färbung: damit also der Versuch gelinge, ist es nöthig, daß das Licht vor seinem Eintritte in das Glimmerblättchen zuvor polarisirt sei. Diese Thatsache wurde noch über allen Zweifel erhoben, als er durch das Glimmerblättchen Licht hindurchgehen ließ, das von einem schwarzen Spiegel reflectirt war: denn es wurden in diesem Falle die vom Doppelspath hervorgerufenen Farben um so lebhafter, je mehr sich der Winkel, unter welchem das Licht reflectirt wurde, dem Polarisationswinkel des Glases näherte.

In gleicher Weise wird das durchgehende polarisirte Licht von allen doppeltbrechenden Substanzen gefärbt, wenn dieselben in dünne Platten parallel zur Axe geschnitten sind, wie Gips, Bergkrystall, Doppelspath; aber die Dicke, die man den Platten geben muß, damit das polarisirte Licht gefärbt erscheine, wechselt von einem Stoffe zum andern, und man erhält farbige Bilder nur dann, wenn diese Dicke innerhalb gewisser Grenzen eingeschlossen ist. So muß eine Gipsplatte über $0{,}425^{mm}$ aber

Digitized by Google

unter 1,27 mm, ein Glimmerblättchen unter 0,085 mm, eine Platte von Bergkrystall unter 0,45 mm stark sein. Durch Platten aus Doppelspath Farben zu erhalten ist schwierig, da deren Dicke den vierzigsten Theil eines Millimeters noch nicht erreichen darf.

Durch Neigen der Platten gegen die Richtung der Lichtstrahlen ändert sich die Färbung ziemlich rasch, und ebenso ist auf dieselbe die Dicke der Platten bei gleicher Neigung von großem Einflusse: die Gesetze der Aenderung der Farbennüancen sind, wie Biot gefunden hat, genau dieselben, wie diejenigen, die nach Newton's Versuchen für die Farben dünner Luftschichten gelten, die zwischen einer Linse und einem Planglase eingeschlossen sind; nur ist die Dicke der doppeltbrechenden Blättchen, welche den verschiedenen Farbennüancen entspricht, viel bedeutender, als die Dicke der Luftschicht.

Fig. 261. Farben in gepreßtem Glase.

Diese Eigenthümlichkeit, daß sich die Farben dünner Blättchen mit der Dicke ändern, benutzt man zu mancherlei merkwürdigen Erscheinungen: kittet man auf eine Glasplatte ein Gipsblättchen und schleift man in dasselbe eine sehr flache Vertiefung, deren Fläche ein Theil einer Kugeloberfläche mit großem Radius ist, so erscheinen in derselben concentrische farbige Ringe, ähnlich den Newton'schen, wenn man dieses Blättchen in einem Polarisationsapparate zwischen dem Polarisator und dem Analysator einschaltet. Bringt man in einem solchen Gipsblättchen Vertiefungen in Form von Blumen, Insekten oder ähnlichen Gegenständen an, so erscheinen dieselben im Polarisationsapparate in anderer Farbe, als der Grund, auf dem sie sich befinden, und heben sich dadurch deutlich von demselben ab.

Aehnliche Erscheinungen, wie diese Krystalle zeigt auch das Glas, welches im gewöhnlichen Zustande durchaus nicht polarisirend wirkt, wenn dasselbe geschmolzen und dann schnell gekühlt, oder auch einem starken Drucke, Zuge, einer Biegung oder einseitiger starker Erhitzung unterworfen ist, und man kann leicht unter den angegebenen Bedingungen in

Digitized by Google

rechteckigen Platten aus Spiegelglas Figuren beobachten, wie sie z. B. in Fig. 261 und 262 dargestellt sind, und wie sie zuerst Seebeck im Jahre 1813 wahrgenommen hat; Fig. 261 zeigt zugleich den Apparat, durch den eine quadratische Glasplatte leicht in einer Richtung zusammengepreßt werden kann. Endlich wollen wir hier noch einen Versuch erwähnen, der von Biot herrührt, von Daguin aber in folgender Weise beschrieben wird: zwischen Polarisator und Analysator, die so gestellt waren, daß das Gesichtsfeld dunkel erschien, wurde ein Glasstreifen von 2 Meter Länge gehalten; so lange dieser Streifen in Ruhe war, blieb auch das Gesichtsfeld dunkel: sobald aber in ihm longitudinale Schwingungen erregt wurden, sah man bei jeder Reibung in ihm Licht aufblitzen, dessen Glanz und Farbe von der Art, wie gerieben wurde, und von der Energie der Schwingungen abhängig war.

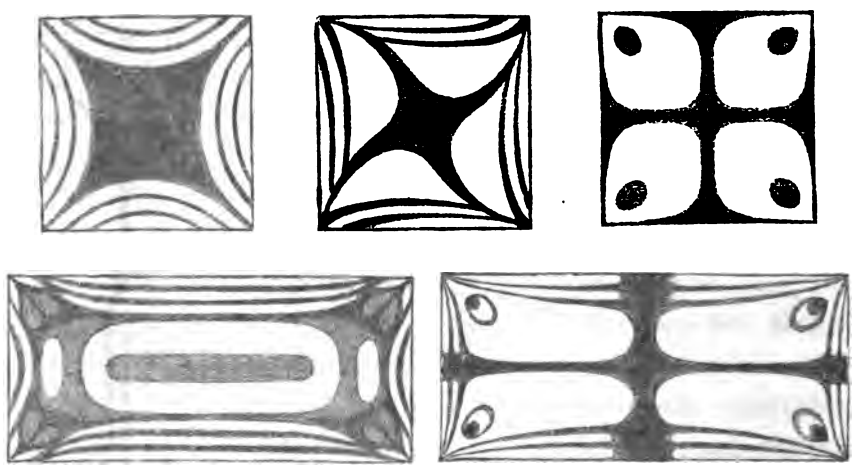
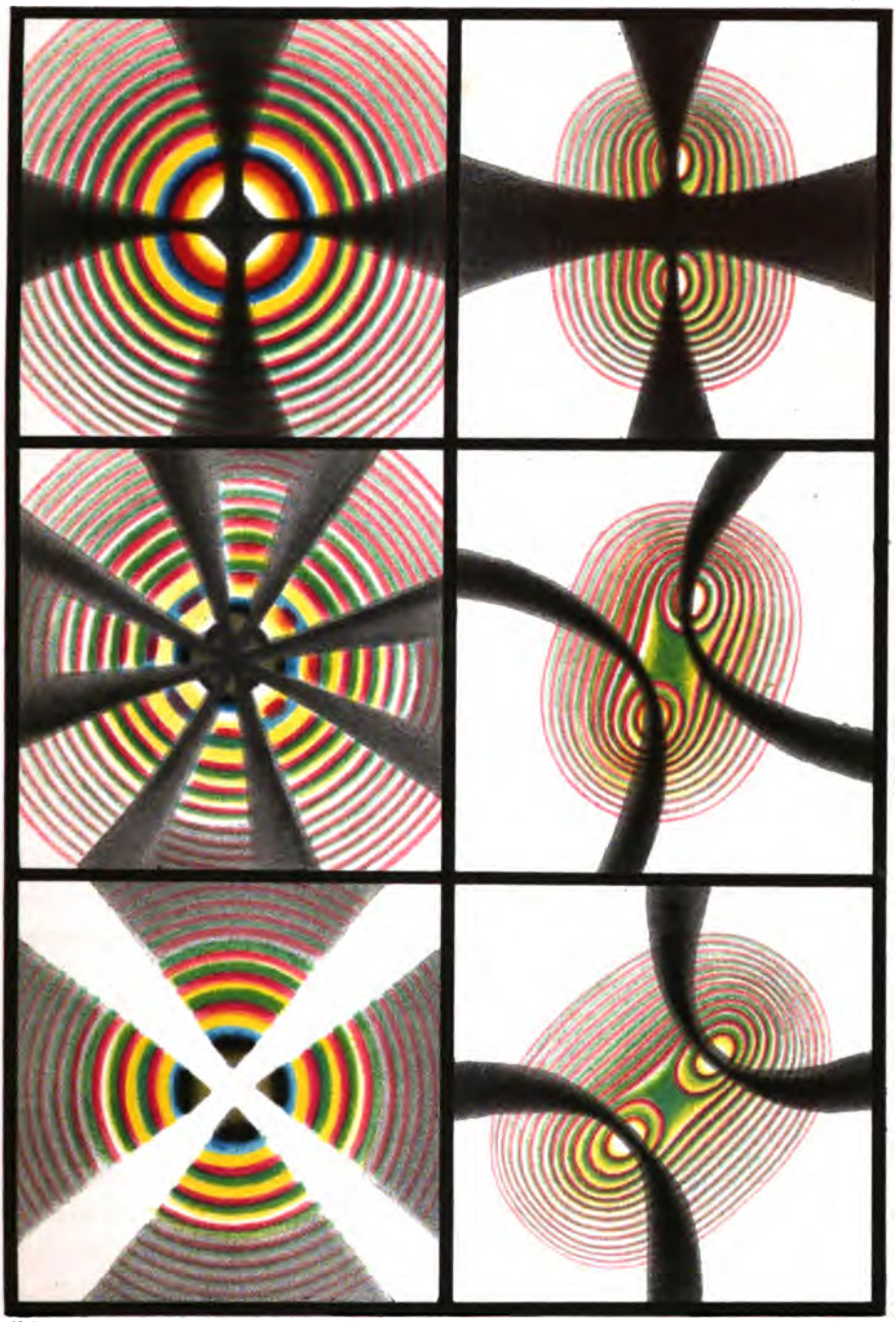


Fig. 262. Farben des polarisirten Lichtes in rasch gekühltem Glase.

Die Farben, welche das polarisirte Licht zeigt, wenn es durch dünne Blättchen hindurchgeht, sind, wie wir schon erwähnten, von der Dicke dieser Blättchen abhängig: sendet man daher durch ein solches gleichmäßig starkes Blättchen ein Lichtbündel, dessen Strahlen parallel sind, so wird jeder Strahl denselben Weg im Innern des Blättchen zu durchlaufen haben, und dadurch wird das ganze Blättchen gleichmäßig gefärbt erscheinen. Wendet man dagegen an Stelle des parallelen Strahlenbündels ein kegelförmiges Strahlenbüschel an, welches so divergirt oder convergirt, daß die Axe des Kegels auf der Krystallplatte senkrecht ist, so werden

Digitized by Google



Mich. Silbermann. Verlag v. Paul Frohberg, Leipzig. Lith. Anst. v. F. Arnold, Leipzig.

FARBIGE RINGE

in ein- und zweiaxigen doppeltbrechenden Krystallen.

Digitized by Google

LIBRARY
OF THE
UNIVERSITY
OF
CALIFORNIA

Digitized by Google

die Wege, welche die einzelnen Strahlen im Innern der Platte zu durchlaufen haben, um so größer sein, je weiter die Strahlen von der Axe entfernt sind, und dadurch wird auch ihre Färbung verschieden erscheinen: man sieht dann eine Reihe farbiger Ringe, deren Gestalt und Färbung davon abhängt, ob man die Platte aus einem ein- oder zweiaxigen Krystalle geschnitten hat, und wie man sie im Polarisationsapparate einstellt.

Um diese sehr schönen Erscheinungen, von denen einige auf Tafel XII dargestellt sind, wahrzunehmen, genügt schon eine Turmalinzange (Fig. 263) und einige kleine geschliffene Krystallplatten, ein Apparat, der von den Mechanikern schon zum Preise von zusammen etwa 30 ℳ an geliefert wird. Die Turmalinzange besteht aus zwei Metallringen, welche durch eine Feder gegen einander gedrückt werden: in jedem dieser Ringe ist eine Turmalinplatte, die parallel zur Axe geschnitten ist, in einer Fassung so befestigt, daß sie in dem Ringe leicht gedreht werden kann. Jede Platte aus einem anderen Krystalle, deren Farbenringe man untersuchen will, ist in einer Fassung von Kork befestigt, sodaß sie sich leicht zwischen die Ringe der Zange festklemmen läßt. Blickt man nun durch die Turmalinplatte nach den Wolken oder einen anderen hellen Gegenstand, so wird das Licht, das derselbe aussendet, in der ersten Turmalinplatte polarisirt und durchdringt hierauf die eingeschaltete Krystallplatte und die zweite Turmalinplatte, indem es nach unserem Auge hin convergirt: es sind also alle Bedingungen für das Erscheinen der farbigen Ringe erfüllt.

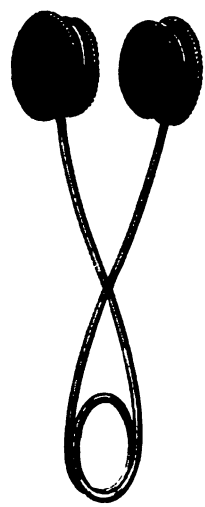


Fig. 263. Turmalinzange.

Schaltet man z. B. eine Platte aus Doppelspath ein, deren Grenzflächen auf der Axe senkrecht stehen, und stellt man die beiden Turmalinplatten so, daß ihre Axen rechtwinkelig zu einander sind, so sieht man eine Reihe farbiger Ringe, die von einem schwarzen Kreuze durchschnitten werden, so wie es auf Tafel XII links oben dargestellt ist. Dreht man nun den Analysator um 90°, so erscheint an Stelle des schwarzen Kreuzes ein weißes Kreuz, die Farben der Ringe aber haben sich sämmtlich in ihre Complementärfarben verwandelt, wie es auf derselben Tafel links

Digitized by Google

unten dargestellt ist. Die Zeichnung endlich, die sich zwischen beiden befindet, entspricht einer Neigung der Axen der Turmalinplatten von 45°. Hätte man an Stelle des weißen Lichtes einfarbiges Licht angewendet, so werden die Ringe abwechselnd nur diese Farbe und Schwarz zeigen, und statt des weißen Kreuzes bei paralleler Stellung der Axen würde ein Kreuz in der Farbe des einfallenden Lichtes zu sehen sein. Je brechbarer die gewählte Farbe ist, desto enger sind auch die Ringe, und hieraus erklärt es sich, daß bei Anwendung von weißem Lichte alle Spectralfarben neben einander erscheinen, weil sich die Systeme der Ringe der einzelnen Farben nicht genau über einander legen.

Im Jahre 1813 hat Brewster diese farbigen Ringe in Krystallplatten entdeckt und zuerst im Rubin, Smaragd, Topas, Eis und Salpeter beobachtet: später fand sie Wollaston auch im Doppelspath. Beim weiteren Verfolg dieser Entdeckung bemerkte Brewster nun einen wesentlichen Unterschied zwischen den einzelnen Krystallen: während er nämlich beim Rubin, Smaragd und Doppelspath nur ein einziges System von Ringen wahrnahm, sah er, daß sich in anderen Stoffen, wie Topas und Salpeter, wenn dieselben in bestimmter Richtung geschnitten wurden, ein doppeltes System von Ringen bildete, die entweder nur hell und dunkel waren, oder auch in allen Farben erschienen, je nachdem er einfarbiges oder weißes Licht anwendete. Diese Entdeckung führte ihn zu dem Schlusse, daß es in diesen Krystallen zwei optische Axen geben müsse, und so wurden von ihm zuerst die optisch einaxigen und die optisch zweiaxigen Krystalle unterschieden. Schneidet man z. B. einen Salpeterkrystall senkrecht zu der Linie, welche den Winkel der optischen Axe halbirt, und bringt man die Platte zwischen die Turmalinzange, deren Krystallaxen rechtwinklig zu einander stehen, so sieht man Figuren, wie sie auf der rechten Seite der Tafel XII dargestellt sind, und zwar entspricht die unterste dem Falle, daß die Ebene der Axen der ursprünglichen Polarisationsebene parallel ist, die oberste dem Falle, daß beide einen Winkel von 45° bilden, die mittlere aber einer mittleren Lage. Beim Weiterdrehen wiederholen sich dieselben Erscheinungen in den übrigen Quadranten. Dreht man den Analysator, so gehen die schwarzen Linien in weiße, die Farben der Ringe in ihre Complementärfarben über.

Diese Erscheinungen mögen genügen, um zu zeigen, welche Reihe merkwürdiger Vorgänge durch die Entdeckung des polarisirten Lichtes uns

Digitized by Google

UNIVERSITY OF CALIFORNIA

erschlossen worden ist: weitere Beobachtungen zu besprechen, wie sie in großer Zahl in den letzten Jahrzehnten angestellt sind, und wie sie zum größten Theile aus der Theorie abgeleitet wurden, ehe man sie praktisch ausführte, das würde die Grenzen und Ziele dieses Werkes weit überschreiten. Wohl aber müssen wir uns die Frage stellen, wie sich diese Thatsachen in die Undulationstheorie einreihen, und welche Förderung dieser Theorie durch dieselben zu Theil geworden ist; und wenn eine erschöpfende und genügende Antwort auf diese Frage auch ohne höhere Mathematik nicht wohl gegeben werden kann, so wollen wir doch den Versuch machen, einigermaßen eine Vorstellung zu geben, in welcher Weise man der Lösung dieses Problems näher gekommen ist.

Wir haben in dem vorigen Kapitel erwähnt, daß die Erscheinungen der Interferenz und Beugung des Lichtes durch die Emissionstheorie eine genügende Erklärung nicht finden, und daß es daher nothwendig wurde, diese Theorie vollständig aufzugeben und an ihre Stelle die Undulationstheorie zu setzen, aus welcher sich jene Erscheinungen sehr leicht erklärten. Wir nahmen nun als eine Thatsache, die nicht viel Zweifel zuließ, an, daß das Licht in Schwingungen des Aethers besteht, daß seine Bewegung eine Wellenbewegung ist; und es entsteht nun die neue Frage, in welcher Richtung die Schwingungen der Aethertheilchen erfolgen. Die Erscheinungen der Interferenz geben hierüber keinen Aufschluß: dieselben lassen sich eben so leicht erklären, mag man annehmen, daß die Schwingungen longitudinal sind, d. h. daß sich die Aethertheilchen in der Richtung, in der sich der Strahl ausbreitet, hin und her bewegen, oder mag man transversale Oscillationen, die in der Richtung der Wellenoberfläche erfolgen, voraussetzen, oder mag man sonst eine Richtung, welche mit jener Fläche irgend einen Winkel bildet, als Richtung der Schwingungen ansehen.

Nach Analogie der Vorgänge beim Schalle entschied man sich zuerst für die Annahme, daß die Schwingungen longitudinal seien, daß also die Aethertheilchen ihre Oscillationen in derselben Richtung ausführten, in welcher sich der Strahl im Raume weiter verbreitet: doch bald zeigte sich das Unhaltbare dieser Voraussetzung. Denn wenn die Theilchen nur in der Längsrichtung des Strahles schwingen, wie soll man es dann erklären, daß ein Strahl, welcher durch einen doppeltbrechenden Krystall gegangen oder von einer spiegelnden Fläche zurückgeworfen ist, nach der einen Seite hin andere Eigenschaften besitzt, als nach der anderen?

Digitized by Google

Schon lag die Befürchtung nahe, daß dieser Einwurf die ganze Undulationstheorie in Frage stellen könnte, als Fresnel auf den Gedanken kam, daß der Fehler wohl darin liegen möge, daß man die Lichtschwingungen für Longitudinalschwingungen angesehen hatte, und daß wohl anzunehmen sei, daß dieselben im transversalen Sinne erfolgen. Wenn also von einem Punkte Licht ausgeht, das sich in gerader Linie ausbreitet, so schwingen nach dieser Ansicht die Aethertheilchen in senkrechten Richtungen zu der Richtung des Strahles: nun kann man aber auf einer geraden Linie im Raume in jedem Punkte derselben nach den verschiedensten Seiten hin Senkrechte errichten; und so werden beim gewöhnlichen Lichte die Schwingungen auch abwechselnd nach allen diesen Richtungen hin erfolgen, sodaß sich bei einem gewöhnlichen Lichtstrahle nicht eine Seite durch irgend welche Eigenschaft von der anderen unterscheidet. Sobald dagegen der Strahl durch eine Turmalinplatte gegangen ist, oder sobald er von einer Glastafel unter dem Winkel von 54° 35′ zurückgeworfen ist, so erfolgen die Schwingungen nur noch in einer bestimmten, auf der Richtung des Strahles senkrechten Richtung, sie liegen also alle in einer Ebene, die zugleich den Strahl enthält. Der Polarisator hat, so zu sagen, die Schwingungen des gewöhnlichen Lichtes gesiebt, er hat alle verschluckt, die nicht in einer ganz bestimmten Richtung erfolgen, und gestattet nur den in dieser Richtung erfolgenden Schwingungen die weitere Ausbreitung. *Unter polarisirtem Lichte verstehen wir also solches Licht, bei welchem die Schwingungen der Aethermolecüle nur in einer einzigen, auf dem Strahle senkrechten Richtung erfolgen.* Untersucht man nun die einzelnen Fälle, in denen das Licht polarisirt wird, so findet man, daß bei einaxigen doppeltbrechenden Krystallen die Schwingungen des extraordinären Strahles in die Ebene des Hauptschnittes fallen, die des ordinären Strahles dagegen in senkrechter Richtung zu dieser Ebene erfolgen; bei einem Strahle, der von einer spiegelnden Fläche vollständig polarisirt zurückgeworfen wird, sind die Oscillationen mit der Spiegelfläche parallel, in einem Strahle dagegen, der durch einfache Refraction polarisirt ist, liegen sie in einer Ebene, die auf der brechenden Ebene senkrecht steht.

Aus dieser Theorie, welche jetzt allgemein als die richtige anerkannt wird, sind sehr viele wichtige Consequenzen gezogen worden, die alle ohne Ausnahme, durch den Versuch bestätigt werden konnten: unter den

Digitized by Google

Tausenden von Erscheinungen der Ausbreitung, Reflexion, Brechung, Interferenz und Polarisation des Lichtes giebt es nicht eine einzige, deren Erklärung sich nicht mit mathematischer Strenge aus der Undulationstheorie geben ließe.

Zum Schlusse wollen wir noch einige Anwendungen erwähnen, welche man in den Naturwissenschaften von der Polarisation des Lichtes gemacht hat, um zu zeigen, daß diese Erscheinungen, welche zunächst nur ein theoretisches Interesse darzubieten scheinen, doch auch für die Praxis einen bedeutenden Nutzen gewähren können. Durch das Gesetz, nach welchem sich die Lichtstärke der beiden Bilder in einem doppeltbrechenden Krystalle ändert und das von Malus gefunden wurde, gelang es Arago einen Apparat zu construiren, durch welchen sich die Stärke zweier Lichtquellen leicht vergleichen ließ. Weiter giebt derselbe Gelehrte ein einfaches Mittel an, durch welches man Untiefen und Klippen wahrnehmen kann, die unter dem Meeresspiegel verborgen sind und deren Anblick durch den Glanz des Meeres verdeckt wird: betrachtet man nämlich die Meeresfläche durch ein Nicol'sches Prisma, das man so vor das Auge hält, daß sein Hauptschnitt auf der Horizontalebene senkrecht steht, so wird das vom Wasserspiegel reflectirte Licht durch dasselbe verschluckt; dagegen dringen die Strahlen von den Felsen unter dem Wasser, welche beim Uebergange aus Wasser in Luft gebrochen werden, in unser Auge und lassen uns die Körper deutlich erkennen.

An der Polarisation erkennt man, ob das Licht, das von einem fernen Körper zu uns gelangt, von ihm selbst ausgeht, oder nur von seiner Oberfläche reflectirt wird: und so hat man den sicheren Beweis geführt, daß der Mond und die Planeten uns nur solches Licht senden, das sie selbst erst von der Sonne erhalten haben; auch das Licht, das von den Kernen der Kometen kommt, ist wenigstens zum Theil nur reflectirtes Sonnenlicht, denn mehrere Beobachter haben deutliche Spuren von Polarisation in einer Ebene, die durch die Sonne, den Kern des Kometen und unser Auge geht, gefunden. Ebenso ist das Licht des Regenbogen in einer Ebene polarisirt, die auf der Biegung des Bogens senkrecht ist: und wir werden später sehen, daß das Licht dieser glänzenden Lufterscheinung Sonnenlicht ist, welches von den Regentropfen reflectirt wird.

Auch für das Erkennen der Edelsteine hat Arago die Polarisation

Digitized by Google

nutzbar gemacht: läßt man von der Fläche eines Steines Licht reflectiren, das man durch ein Nicol'sches Prisma betrachtet, und untersucht man den Winkel, bei welchem dasselbe vollständig polarisirt erscheint, so wird man, wenn man die Größe dieses Winkels nahezu gleich 70° findet, mit Sicherheit annehmen dürfen, daß der untersuchte Stein ein Diamant ist. Für die Kenntniß der Krystallformen läßt sich die farbige Polarisation mit Erfolg anwenden: durch sie findet man leicht, ob ein Körper eine oder zwei optische Axen besitzt, und unter welchem Winkel sich in letzterem Falle dieselben schneiden. Endlich besitzt der Quarz und einige andere Körper, wie das Eiweiß und Lösungen von Zucker und Weinsteinsäure, die merkwürdige Eigenschaft, daß sie im Polarisationsapparate die Polarisationsebene des Lichtes drehen: stellt man Polarisator und Analysator des Polarisationsapparates so ein, daß das Gesichtsfeld dunkel erscheint, und bringt man dann zwischen beide eine Platte aus Bergkrystall, die senkrecht zur Axe geschnitten ist, so wird man bei Anwendung von einfarbigem Lichte nunmehr das Gesichtsfeld in diesem Lichte erblicken, und man muß den Analysator nach rechts oder links weiter drehen, damit das Gesichtsfeld wieder dunkel erscheint. Diese Drehung ist um so größer, je dicker die Krystallplatte ist, und ebenso ist deren Größe für die einzelnen Farben verschieden: daher wird bei Anwendung von weißem Lichte das Gesichtsfeld niemals dunkel erscheinen, sondern immer eine bestimmte Färbung zeigen; will man also Messungen mit weißem Lichte anstellen, so muß man die Größe der Drehung für eine bestimmte Farbennüance messen. Diese Erscheinung, welche man als Circularpolarisation bezeichnet, wurde 1811 von Arago entdeckt; ihre Gesetze erforschte aber hauptsächlich Biot auf experimentellem Wege. Da auch Zuckerlösungen dieselbe Eigenschaft besitzen, und da bei ihnen die Größe der Drehung von der Sättigung der Lösung abhängt, so giebt diese Drehung der Polarisationsebene ein treffliches Mittel, um den Zuckergehalt einer Flüssigkeit zu bestimmen. Auf ihr beruhen die Saccharimeter, welche in der Medicin eine sehr wichtige Anwendung bei der Untersuchung in Krankheitsfällen finden, in denen die Ausscheidungen des Körpers zuckerhaltig sind.

Digitized by Google

Siebentes Kapitel.

Messung der Stärke der Lichtquellen.

§ 1. Principien der Photometrie.

Wir wissen alle, daß die leuchtende Kraft einer Lichtquelle abnimmt, je größer der Abstand ist, in dem sich ein Körper befindet, der von ihr sein Licht empfängt. Lesen wir des Abends beim Scheine einer Lampe oder einer Kerze, so können wir ferner sehr leicht wahrnehmen, daß sich der Grad der Erleuchtung auch sehr verändert, wenn wir dem Buche eine andere Neigung zur Richtung der Strahlen geben, auch ohne daß wir uns dem Lichte nähern oder von ihm entfernen; und endlich ist es klar, daß wir den Grad der Erleuchtung in bestimmtem Verhältnisse steigern können, wenn wir an Stelle einer Kerze deren mehrere in demselben Abstande aufstellen, oder wenn wir statt einer kleinen Lampe eine andere aufstellen, deren Docht eine Flamme von größerer Ausdehnung giebt. Andererseits aber ist auch die Leuchtkraft verschieden nach der Natur der Lichtquellen, wenn auch sonst alle übrigen Verhältnisse ungeändert bleiben: eine Gasflamme spendet uns bedeutend mehr Licht, als die Flamme einer mit Oel gespeisten Lampe, wenn dieselbe auch mit jener gleiche Ausdehnung besitzt; und das Licht des Mondes ist ungleich schwächer, als das der Sonne, obgleich beide Gestirne uns als Scheiben von nahezu gleicher Größe erscheinen.

Will man daher die Intensität zweier Lichtquellen vergleichen, so muß man diejenigen Verhältnisse, die in der Natur der Quellen selbst begründet sind, wohl von denjenigen unterscheiden, welche von der Lage der erleuchteten Gegenstände, also von dem Abstande und der Neigung der Flächen abhängen. Diese Beziehungen aufzufinden und die sich daraus ergebenden Stärkenverhältnisse zu messen, das ist die Aufgabe des Zweiges der Optik, den man als Photometrie bezeichnet.

Die Intensität der Lichtquellen zu messen, ist aber keine so leichte Aufgabe, und trotz aller Fortschritte, welche die Optik bisher gemacht hat, besitzt man doch noch kein Instrument, durch das sich jene Größe mit derselben Genauigkeit bestimmen ließe, wie andere physikalische Größen, wie sich z. B. der Luftdruck durch das Barometer, die Temperatur durch

Digitized by Google

das Thermometer, die Schwingungszahl der Töne durch Sirene und Vibroskop bestimmen läßt. Davon ist die Photometrie noch weit entfernt, und die Vergleichung der Intensität zweier Lichter läßt noch sehr viel zu wünschen übrig. Woher aber rührt diese Unvollkommenheit, worin hat die Unsicherheit und Ungenauigkeit der Lichtmessung ihren Grund? Nur darin, daß wir zur Schätzung der Lichtstärke keinen anderen Maßstab haben, als die Empfindung unseres Sehwerkzeuges: und so fein unser Auge auch Farbenunterschiede wahrnimmt, so feine Linien und Punkte von ihm wahrgenommen und unterschieden werden, so ist es doch wenig geeignet, die genauen Verhältnisse der Stärke von Lichtern, die gleichzeitig oder nach einander auf dasselbe wirken, bemerklich zu machen.

Schon wenn es sich nur darum handelt anzugeben, ob zwei Lichtquellen gleiche Stärke besitzen oder nicht, ist die Schwierigkeit nicht gering; und wenn vielleicht die beiden Beobachtungen nicht gleichzeitig angestellt werden, so wächst die Schwierigkeit mit der Größe der Zwischenzeit, welche zwischen beiden vergeht: die erste Forderung, die sich aber nicht immer erfüllen läßt, würde also die sein, daß man beide Lichter gleichzeitig beobachtet. „In dieser Beziehung," sagt J. Herschel in seiner Abhandlung über das Licht, „eignet sich das Auge nicht besser zur Messung der Lichtstärke, als die Hand zur Bestimmung des Gewichtes eines Körpers, der auf gut Glück aufgegriffen wird. Diese Unsicherheit wächst noch durch die Beschaffenheit des Sehwerkzeuges selbst, das sich beständig in einer zitternden Bewegung befindet, welche durch die Erweiterungen und Verengerungen der Pupille infolge des Lichtreizes selbst, und durch die wechselnde Empfindlichkeit des Sehnerves bewirkt wird. Vergleicht man den blendenden Glanz eines Blitzes in einer dunkeln Nacht mit der Empfindung, welche dieselbe Erscheinung bei Tage hervorruft, so ist es sehr auffällig um wie viel schmerzhafter im ersteren Falle unser Auge von ihr berührt wird: die heftige Erregung, welche die Sehnerven unserer Netzhaut erleiden, macht sich noch einige Augenblicke für unsere Wahrnehmung bemerklich, indem immer noch die Empfindung von einem Wechsel von Dunkelheit und grellem Lichte eine Zeit lang für uns andauert. Bei Tage zeigt sich keine solche Wirkung, und wir verfolgen mit der größten Leichtigkeit den Zickzack des Blitzes, ohne so auffällig von dem grellen Lichte getroffen zu werden, das uns die vorangehende und nachfolgende Dunkelheit so stark empfinden läßt." In den meisten

Digitized by Google

Fällen blendet und verletzt die directe Einwirkung der Lichtquelle unser Auge und macht es dadurch unfähig, auch nur annähernd ihre Stärke zu schätzen: deshalb vergleichen die Physiker lieber gleichartige Oberflächen, welche von den Quellen in gleicher Weise beleuchtet werden, als unmittelbar das von den Quellen ausgehende Licht. Eine letzte Quelle der Unsicherheit, von der man sich kaum befreien kann, besteht in der Verschiedenheit der Farben der Lichtstrahlen, die man vergleichen will. „Für zwei Lichter von verschiedener Färbung läßt sich der Vergleich niemals mit einiger Genauigkeit ausführen; und die Unsicherheit unseres Urtheils wird um so größer, je beträchtlicher der Unterschied in der Färbung ist."

Trotz dieser Schwierigkeiten hat man gesucht, theils auf theoretischem, theils auf experimentellem Wege für die Vergleichung der Lichtstärken einige Grundsätze aufzustellen, die zur Erfindung von Instrumenten geführt haben, von denen wir einige der wichtigeren im nächsten Paragraphen beschreiben wollen. In unseren Tagen, wo man auf gute Beleuchtung sowohl im Hause, als auch auf Straßen immer mehr bedacht sein muß, wo man die Schifffahrt in der Nähe der Küsten durch Aussendung starker Lichter möglichst zu schützen sucht, ist die Anwendung jener Instrumente, die man Photometer nennt, von der größten praktischen Wichtigkeit geworden; die ersten dahin zielenden Versuche aber waren rein wissenschaftlicher Art: denn schon im siebzehnten Jahrhundert versuchten Auzout und Huyghens, und im folgenden Celsius, Bouguer und Wollaston das Verhältniß der Lichtstärke der Gestirne, z. B. das Verhältniß des Glanzes von Sonne und Mond, oder von Mond und Sirius in Zahlen auszudrücken.

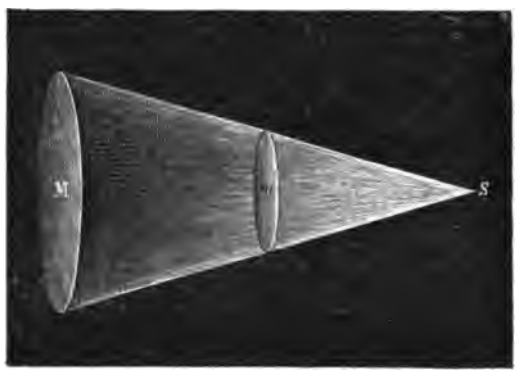


Fig. 264. Abnahme der Lichtstärke mit dem Quadrate der Entfernung.

Der erste Grundsatz, den bereits jene Physiker fanden, läßt sich in folgendem Satze aussprechen: Wird der erleuchtete Körper von der Lichtquelle entfernt, so nimmt die Stärke der Erleuchtung ab mit dem Quadrate der Entfernung. Vom

Digitized by Google

leuchtenden Punkte S (Fig. 264) gehen ja die Strahlen nach allen Seiten hin in gleicher Intensität: allein sie divergiren, entfernen sich also immer weiter von einander. Fängt man nun die Strahlen auf der Oberfläche einer Kugel von bestimmtem Radius auf, deren Mittelpunkt der leuchtende Punkt selbst ist, so werden sie auf einem Stücke m der Fläche eine Erleuchtung von bestimmter Intensität hervorrufen: läßt man dagegen dieselben Strahlen, welche auf m treffen, ihren Weg weiter fortsetzen, bis sie zur Oberfläche einer Kugel gelangen, deren Radius doppelt so groß ist, so werden sie sich über eine Fläche M verbreiten müssen, welche aus geometrischen Gründen viermal so groß ist, als m: und da es nur dieselbe Lichtmenge ist, die sich nun über M verbreitet, so wird jeder Punkt von M nur den vierten Theil so stark erleuchtet sein, als ein Punkt von m. Ebenso ist bei dreifachem Abstande die Erleuchtung nur den neunten Theil so stark u. s. w., kurz, sie nimmt ab mit dem Quadrate der Entfernung. Natürlich ist dieses Gesetz nur so lange giltig, als man die Absorption des Lichtes in dem Mittel, durch welches dasselbe hindurchgeht, vernachlässigen darf; unter dieser Bedingung darf man es aber auch anwenden, wenn das Licht nicht von einem einzelnen Punkte, sondern von einer leuchtenden Fläche ausgeht, wenn dann nur der Abstand so groß ist, daß man die Verschiedenheit der Entfernungen der einzelnen leuchtenden Punkte vom erleuchteten Körper vernachlässigen kann.

Hält man daher ein Stück weißes Papier einer Kerze gegenüber und entfernt man sich dann doppelt, dreimal, viermal so weit, so wird das Papier nur noch den vierten, neunten, sechzehnten Theil so stark erleuchtet erscheinen: vorausgesetzt, daß man das Papier immer so hält, daß seine Fläche auf der Richtung der Strahlen senkrecht ist. Neigt man dagegen die Fläche des Papieres, ohne seinen Abstand zu ändern, so muß auch dadurch der Grad der Erleuchtung abnehmen, weil nunmehr die Fläche von einer geringeren Anzahl von Strahlen getroffen wird, als wenn es auf der Richtung der Strahlen senkrecht steht; und je mehr die Richtung der Senkrechten auf der Fläche von der Richtung der Strahlen abweicht, je größer also mit anderen Worten der Einfallswinkel ist, desto geringer ist auch der Grad der Erleuchtung. Unter Voraussetzung der Grundbegriffe der Trigonometrie kann man daher sagen, daß die Erleuchtung dem Cosinus des Einfallswinkels direct proportional ist.

Digitized by Google

In allen diesen Fällen handelt es sich um die gesammte leuchtende Kraft der ganzen Lichtquelle, nicht aber um die Lichtstärke jedes einzelnen Punktes an der Oberfläche derselben: bleibt nun die leuchtende Kraft jedes einzelnen Punktes dieselbe, wird dabei aber die Fläche der Lichtquelle vergrößert, so wächst auch die Leuchtkraft des ganzen Körpers in demselben Verhältnisse; ebenso wächst diese Kraft, wenn sich die Größe der Fläche nicht ändert, dafür aber die Intensität jedes einzelnen Punktes zunimmt. Hieraus folgt, daß der Glanz jedes einzelnen Punktes einer Fläche, die uns Licht sendet, sich mit dem Abstande nicht ändert: denn wenn wir uns von der Lichtquelle entfernen, so nimmt die Lichtmenge, die in unser Auge dringt, mit dem Quadrate der Entfernung ab; in demselben Grade verkleinert sich aber auch die scheinbare Größe der leuchtenden Fläche, sodaß das geringere Quantum Licht von einer in demselben Grade verkleinerten Fläche auszustrahlen scheint: jeder einzelne Punkt wird also noch dieselbe Helligkeit besitzen, als zuvor. Betrachten wir daher zu verschiedenen Zeiten bei gleich reiner Atmosphäre und in gleicher Höhe über dem Horizonte die Planeten Venus, Mars oder Jupiter, so wird uns jeder Punkt der Oberfläche eines dieser Planeten immer in derselben Helligkeit erscheinen, wenn sich auch der Planet in sehr verschiedenen Abständen von uns befindet: die Gesammtmenge des Lichtes dagegen wird sehr verschieden sein, je nach der Fläche, unter welcher der Planet unserem Auge erscheint. Die Sonne erscheint auf allen Planeten, vom Neptun bis zum Mercur, als eine glänzende Scheibe, deren Oberfläche aber von 1 bis 7000 wächst: in demselben Maße muß sich also auch die Lichtmenge, welche jeder Planet von ihr erhält, abändern; die Helligkeit jedes Punktes der Sonnenoberfläche ist aber auf dem Neptun eben so groß, als auf dem Mercur, vorausgesetzt, daß der Weltenraum das Licht gar nicht, die Atmosphäre der einzelnen Planeten aber dasselbe in gleichem Grade absorbiren.

Betrachtet man im Dunkeln eine rothglühende Kanonenkugel, so macht sich die Kugelform dem Auge in keiner Weise bemerklich: man glaubt eine flache kreisförmige Scheibe zu sehen, deren Punkte alle gleiche Intensität des Lichtes besitzen; nimmt man statt der Kugel eine prismatische Stange aus Eisen oder Silber und erhitzt man dieselbe bis zum Weißglühen, so zeigt sich eine ähnliche Erscheinung. In keiner Stellung wird man die Kanten des Prisma bemerken und der Glanz wird überall

Digitized by Google

derselbe sein, mögen sich die Flächen in senkrechter Stellung oder in größerer oder geringerer Neigung dem Auge zeigen: der Beobachter wird glauben, eine vollständig ebene Fläche von rechteckiger Gestalt vor sich zu sehen. Dreht man die Stange um ihre Axe, so wird sich diese Bewegung nur dadurch bemerklich machen, daß sich die Breite des leuchtenden Bandes ändert; der Glanz jeden Punktes aber bleibt derselbe. Hieraus folgt, daß die Lichtmenge, welche von einem glühenden festen Körper in einer bestimmten Richtung ausgesendet wird, von der Neigung der Fläche gegen den ausgesendeten Strahl abhängig ist. Denn wollten wir annehmen, daß zwei gleiche Stücke der Oberfläche, von denen das eine senkrecht zur Richtung der Strahlen liegt, während das andere mit der Richtung der Strahlen einen spitzen Winkel bildet, gleiche Lichtmengen in unser Auge sendeten, so müßte uns das geneigte Stück viel glänzender erscheinen, weil sich dieselbe Zahl von Strahlen wegen der Schiefe der Richtung auf einem viel kleineren Raume zusammendrängen würde. Die Sonne ist eine leuchtende Kugel, und doch erscheint sie uns als eine Scheibe, die bei oberflächlicher Betrachtung überall gleich hell ist; genauere Untersuchungen haben sogar ergeben, daß die Helligkeit der Sonne nach dem Rande hin etwas abnimmt, was man als einen Beweis für das Vorhandensein einer Atmosphäre anzusehen hat. Das Gesetz, daß sich die Lichtstärke mit dem Cosinus des Winkels ändert, den die Strahlen mit dem Einfallslothe auf der Fläche bilden, gilt also nicht nur in dem Falle, daß eine Fläche von einer Lichtquelle erleuchtet wird, sondern auch dann, wenn Licht von einer Fläche ausstrahlt.

§ 2. Das Photometer.

Dies sind die Principien, die man bei der Construction der Photometer zu beobachten hat, von denen wir jetzt einige der wichtigeren besprechen wollen. Beim Photometer, das von Rumford angegeben wurde (Fig. 265), befindet sich vor einem Rahmen, der mit weißem Papiere bespannt ist, ein senkrechter schwarzer cylindrischer Stab, hinter welchem die beiden Lichter, deren Intensität man vergleichen will, so aufgestellt werden, daß die beiden Schattenbilder, welche sie auf den Schirm werfen, sich berühren. Der Schatten wird bei dieser Anordnung niemals ein vollständiger sein, denn die Theile des Schirmes, welche im Schatten des

Digitized by Google

ersten Lichtes liegen, erhalten vom zweiten noch das volle Licht, und umgekehrt, sodaß die Bilder nur ein mehr oder weniger tiefes Grau zeigen. Erscheint nun das eine Bild etwas lichter, als das andere, so entfernt man die Lichtquelle, von welcher es erleuchtet wird, indem man immer dafür sorgt, daß sich die Schatten berühren, bis das Auge keinen Unterschied in der Dunkelheit beider Bilder bemerken kann. Sobald diese Bedingung erfüllt ist, was man am schärfsten beobachten kann, wenn man sich hinter dem Schirme aufstellt und den Schatten im durchscheinenden Lichte beobachtet, so weiß man, daß der Schirm von beiden Lichtquellen gleich stark erleuchtet wird: mißt man nun den Abstand jeder Lichtquelle vom Schirme, und erhebt man die gefundenen Längen auf

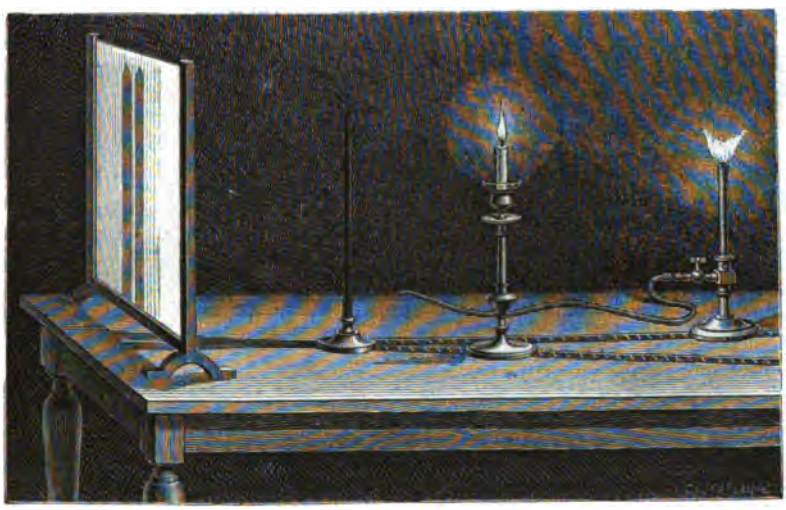


Fig. 265. Photometer nach Rumford.

das Quadrat, so geben diese Zahlen nach dem ersten Gesetze des vorigen Paragraphen das Verhältniß der Intensität beider Lichter.

Auch bei Bouguer's Photometer (Fig. 266) wird das Licht der beiden Lichtquellen auf einem Schirme aufgefangen, der aus einem durchscheinenden Stoffe, etwa Papier, das mit Oel getränkt ist, mattgeschliffenem Glase, oder dünnem Porzellan, besteht, und vor welchem eine dünne, undurchsichtige, schwarze Scheidewand den Raum in zwei Theile theilt. Bringt man nun die beiden Lichter in die beiden Abtheilungen des Raumes, so wird jede Hälfte des Schirmes nur von der einen Lichtquelle erleuchtet, und zwischen diesen hellen Theilen befindet sich nur eine schmale schwarze Linie, der Schatten der Scheidewand. Auch hier führt man die Ver-

Digitized by Google

gleichung dadurch aus, daß man die Lichter so lange verschiebt, bis beide Theile gleich stark erleuchtet erscheinen, daß man ferner die Entfernungen der Lichter vom Schirme mißt und die gefundenen Längen quadrirt. Mit diesem Apparate ist es sehr leicht nachzuweisen, daß man vier Kerzen in doppelte, neun Kerzen in dreifache Entfernung bringen muß, wenn sie nur noch so stark leuchten sollen, wie eine Kerze in einfacher Entfernung.

Bei Bunsen's Photometer endlich werden die Intensitäten verschiedener Lichter mit der Stärke einer Normalflamme, z. B. der Flamme einer Paraffinkerze von bestimmten Dimensionen, verglichen: vor dieser Flamme befindet sich ein innen geschwärztes Rohr, in dem sich ein ähnliches etwas engeres Rohr bewegen läßt, indem man letzteres entweder

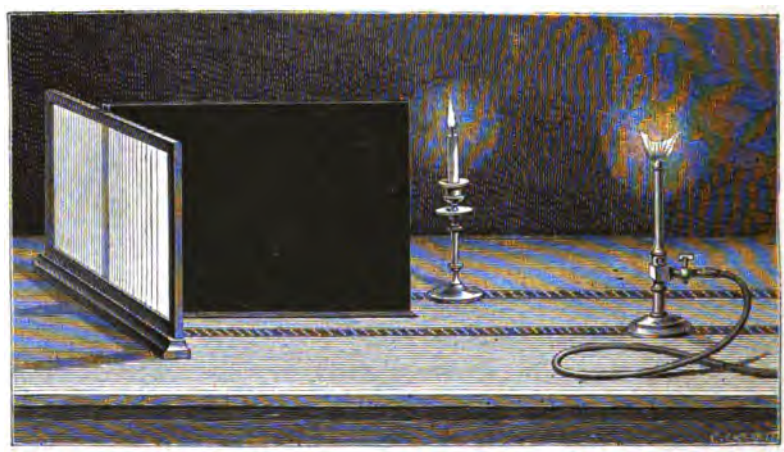


Fig. 266. Photometer nach Bouguer.

etwas weiter herauszieht oder weiter hineinschiebt. Dieses kleine Rohr ist am Ende durch ein Blatt weißes Papier abgeschlossen, in dessen Mitte ein Fleck mit Stearin getränkt und somit durchsichtig gemacht ist, während der äußere Ring undurchsichtig bleibt. Wird nun vor diesem Papiere ein Licht aufgestellt, so wird der Rand erleuchtet erscheinen, während die Strahlen durch die Mitte hindurchgehen ohne dieselbe zu erleuchten: dafür wird aber die Mitte durch die Strahlen erleuchtet, welche von der Normalflamme längs des Rohres auf das Papier treffen. Schiebt man nun das Rohr so lange hin und her, bis Mitte und Rand des Papieres gleich stark erleuchtet erscheinen, so kann man aus dem Abstande beider Lichtquellen von dem Papiere deren Stärke mit einander

Digitized by Google

vergleichen. Dieses Photometer ist als das zuverlässigste jetzt allgemein im Gebrauche, wo es gilt, die Lichtstärke künstlicher Flammen zu messen.

Nun noch einige Resultate, zu denen die Messungen mit dem Photometer geführt haben. Stellt man beim Rumford'schen Photometer zwei vollkommen gleiche Kerzen auf, entfernt aber die eine achtmal so weit als die andere, sodaß sie auf den Schirm Licht wirft, das nur den 64. Theil so intensiv ist, als das Licht der anderen Kerze, so verschwindet der Schatten, den sie wirft, vollständig. Hieraus schloß Bouguer, von dem dieser Versuch herrührt, daß Licht von beliebiger Intensität nicht mehr auf unser Auge wirkt, sobald ein 64 mal stärkeres Licht mit ihm zugleich auftritt. Dies mag wohl der Grund sein, daß man bei Tage die Sterne nicht erblickt, daß uns die Nacht von einem hellerleuchteten Zimmer aus gesehen, durchaus schwarz erscheint, daß man beim hellen Sonnenscheine vom Freien aus nicht in das Innere der Zimmer blicken kann.

Bouguer und Wollaston haben sich mit der Aufgabe beschäftigt, das Licht der Sonne und des Mondes mit einander zu vergleichen, und beide wendeten als Maß das Licht einer Wachskerze an und fanden übereinstimmend, daß die Sonne so stark leuchtet, als 5600 Wachskerzen, die in der Entfernung von 30^{cm} aufgestellt sind. Weiter fand Wollaston, daß das Licht des Vollmondes nur den 144. Theil des Lichtes einer Wachskerze in derselben Entfernung betrage, woraus sich ergeben würde, daß die Sonne 800000 mal so stark leuchtet, als der Vollmond, wogegen Bouguer nur eine 250000 mal so große Intensität für das Sonnenlicht, als für das Licht des Vollmondes bestimmte. Worin der Grund für diesen Widerspruch zu suchen sei, konnte selbst Arago nicht ermitteln, da an der Zuverlässigkeit beider Beobachter nicht zu zweifeln war, und auch in den Methoden, die sie anwendeten, Fehler nicht nachgewiesen werden konnten. Soviel wenigstens ist ganz klar, daß hier noch ein weites Feld der Forschung ist, auf dem viel gethan werden muß, ehe die Resultate einige Zuverlässigkeit erhalten.

Digitized by Google

Achtes Kapitel.

Das Auge des Menschen.

Bei allen den zahlreichen und mannigfaltigen Vorgängen, welche wir bisher beschrieben haben, nahmen wir nur Rücksicht auf die Art, wie sich das Licht in den verschiedenen Mitteln ausbreitete, und auf die Modificationen, die es unter den verschiedenen Bedingungen erlitt, indem sich bald seine Intensität, bald seine Farbe änderte, indem sich die Schwingungen bald unterstützten, bald gegenseitig vernichteten, indem endlich die Oscillationen in ein und dieselbe Ebene verlegt und diese Schwingungsebene selbst wieder verändert und gedreht wurde: wie aber das Licht auf unsere eigenen Sinneswerkzeuge wirkt, und welchen Weg es noch zurücklegen muß, wenn es so zu sagen aus der Außenwelt heraustritt, um für uns zum inneren Vorgange zu werden, das haben wir bisher unberücksichtigt gelassen.

Verfolgen wir nunmehr diesen weiteren Weg, so sehen wir, daß der Lichtstrahl, sobald er unser Auge erreicht, durch einige durchsichtige, gekrümmte Körper gebrochen wird und, nachdem er dieselben durchwandert hat, auf gewisse Nerven trifft, die nur für diese Bewegung empfindlich sind. Jene Wanderung durch die verschiedenen brechenden Mittel des Auges erfolgt in aller Strenge nach den Gesetzen der einfachen Strahlenbrechung, wie wir sie früher kennen lernten, und unser Auge ist nichts anderes, als eine kleine Camera obscura, deren vordere Seite ein durchsichtiges Fenster besitzt, hinter welchem sich eine Linse befindet: diese Linse bricht die Strahlen auf einen Schirm, auf welchem verkehrte Bilder der Gegenstände, die uns umgeben, durch sie gebildet werden. Doch betrachten wir die Theile des Auges etwas genauer.

Das Auge liegt bekanntlich in einer Höhle des Gesichtes unterhalb des Stirnbeins, welche man die Augenhöhle nennt (Fig. 267); in seiner Form weicht es nur wenig von der Kugelgestalt ab, und seine äußere Umhüllung wird durch eine sehr feste Haut, die harte Haut, gebildet, welche in zwei ungleiche Abschnitte zerfällt: der vordere kleinere Theil A ist durchsichtig und heißt Hornhaut, der größere Theil dagegen, die weiße Haut H, ist undurchsichtig und erscheint in den

Digitized by Google

Augenwinkeln als das Weiße im Auge. Zugleich ist die Krümmung der durchsichtigen Hornhaut stärker, als die der weißen Haut, sodaß sich die erstere wie ein bauchiges Uhrglas in den Augapfel einfügt. Hinter der Hornhaut erblickt man eine kreisförmige Haut, die Regenbogenhaut oder Iris D, welche die Farbe des Auges bestimmt, indem sie bei verschiedenen Menschen bald grau, bald heller oder dunkler blau, bald grün, bald gelb oder braun erscheint. Diese Haut dient als eine Art Blende für das Licht, welches nur durch eine Oeffnung in der Mitte derselben, die Pupille C, die wenigstens beim Menschen kreisrund ist, eindringen kann. Hinter dieser Oeffnung, welche gleichsam das

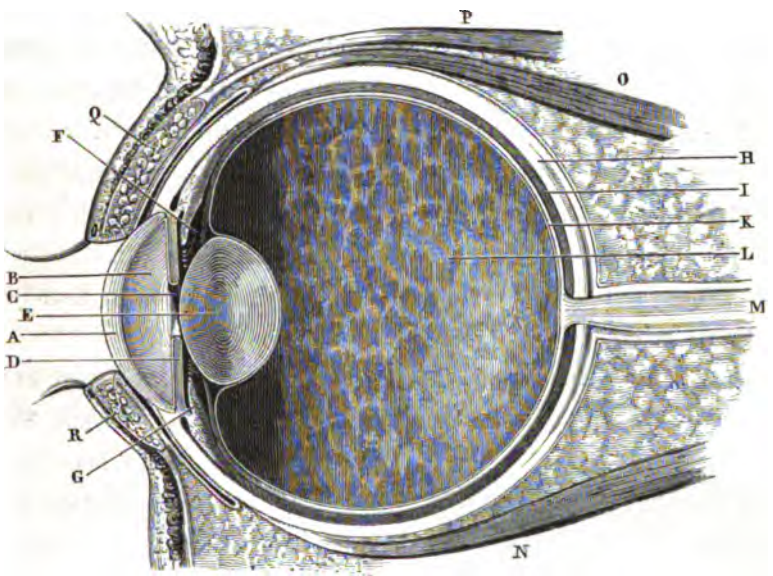


Fig. 267. Längsdurchschnitt des menschlichen Auges.

Fenster der Camera obscura bildet, befindet sich weiter die Krystalllinse E, ein aus festen Häuten gebildeter, linsenförmiger Körper, dessen Krümmung an der vorderen Fläche etwas flacher ist als an der nach hinten liegenden Fläche. Durch diese Linse wird die Höhlung des Augapfels in eine kleinere Vorder- und eine größere Hinterkammer getheilt: erstere (B) ist zwischen Hornhaut und Linse mit einer Flüssigkeit gefüllt, die aus fast reinem Wasser besteht und daher auch wässerige Flüssigkeit heißt; hinter der Linse dagegen befindet sich eine gallertartige Masse, der Glaskörper L. Die ganze innere Höhle ist durch die Aderhaut I ausgekleidet, die an ihrer inneren Fläche einen schwarzen

Digitized by Google

Farbestoff besitzt, welcher verhindert, daß die Lichtstrahlen im Innern des Auges noch wieder Reflexionen erleiden.

Dringt also ein Lichtstrahl in das Auge, so muß er, ehe er die Hinterwand desselben trifft, erst folgende durchsichtige Substanzen durchwandern: die Hornhaut, die wässerige Flüssigkeit, die Krystalllinse und den Glaskörper; in jeder dieser Substanzen erleidet der Strahl eine Brechung, wie in einer Glaslinse, und alle diese Brechungen wirken in solcher Weise, daß von den Gegenständen, welche sich vor dem Auge befinden, auf der hinteren Fläche der Höhlung des Augapfels reelle und verkehrte Bilder entstehen. Dies ist nun die Stelle, wo das Licht auf die eigentlich empfindlichen Theile des Auges trifft, wo also der Vorgang des Sehens stattfindet. Die Rückwand der weißen Haut, wie auch der Aderhaut, ist nämlich durch ein kreisrundes Loch durchbrochen, durch welches ein Bündel von Nerven M in den Augapfel eintritt, welches sich innerhalb der Aderhaut in einer Haut, die mit dem Glaskörper in unmittelbarer Berührung ist und Netzhaut genannt wird (K), vielfach verästelt und in feinen Spitzen endigt. Die Netzhaut bildet den eigentlichen Schirm der Camera obscura, nur daß dieser Schirm Empfindung und Leben besitzt.

Es hat keine Schwierigkeiten, sich über den Weg des Lichtes und die Entstehung des Bildes eines Gegenstandes AB auf der Netzhaut Rechenschaft zu geben, wenn man die Lage des optischen Mittelpunktes O des Linsensystems kennt, das aus allen brechenden Substanzen des Auges besteht: dieser Punkt liegt aber in kurzer Entfernung hinter der Krystalllinse (Fig. 268). Verbindet man nämlich die Punkte AB mit dem Punkte O, und verlängert man diese Linien, bis sie die Netzhaut in ab treffen, so bilden ab die Grenzpunkte des Bildes von AB. Man sieht, daß dieses Bild schon nach den Gesetzen der Strahlenbrechung verkehrt sein muß; diese Thatsache läßt sich aber auch durch directe Beobachtung bestätigen: entfernt man nämlich von der Rückwand des Auges eines soeben getödteten Thieres die harte Haut, so sieht man auf der Netzhaut die sehr kleinen scharfen Bilder der Gegenstände, welche vor

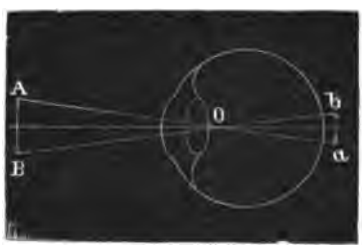


Fig. 268. Entstehung der Bilder im Auge.

Digitized by Google

dem Auge aufgestellt sind, und zwar sind diese Bilder alle verkehrt. Auch mit Hülfe eines Instrumentes, welches jetzt in der Augenheilkunde vielfache Anwendung findet, des Augenspiegels, kann man in das Innere des Auges eines lebenden Menschen hineinsehen, ohne dasselbe zu verletzen oder ihm auch nur Schmerz zu bereiten: und auch in diesem Falle gewahrt man, daß z. B. das Bild einer Flamme auf der Netzhaut verkehrt erscheint.

Wir haben erwähnt, daß die Iris die Stelle einer Blende vertritt, welche nur so viel Licht in das Auge eindringen läßt, als durch ihre Oeffnung, die Pupille, hindurchgeht: nun ist aber die Iris beweglich und läßt sich so zusammenziehen oder ausdehnen, daß dadurch die Pupille verengert oder erweitert wird. Dringt daher eine sehr große Lichtmenge in unser Auge ein, sodaß wir durch dieselbe geblendet werden, so führt die Iris, ohne daß wir es wissen, die Bewegung aus, durch welche sich die Pupille verengert, und verhindert dadurch einen Theil der Strahlen am Eindringen; treten wir dagegen in einen halb dunkeln Raum ein, so wird sich nach einiger Zeit die Pupille erweitern, wodurch von dem vorhandenen Lichte möglichst viel zur Netzhaut gelangen kann. Diese Beobachtungen kann man leicht am Auge eines Anderen anstellen, oder auch am eigenen Auge, wenn man einen Spiegel benutzt.

Da man das Auge mit einem System von Linsen vergleichen kann, so ist es auffällig, daß es im Stande ist, Gegenstände deutlich zu erkennen, die sich in sehr verschiedenen Entfernungen von ihm befinden: denn daß ein deutliches Sehen nur dann stattfinden kann, wenn das Bild auf der Netzhaut ein scharfes ist, das ist wohl selbstverständlich. Daher ist es nothwendig, daß bei der Annäherung eines Gegenstandes auch das System der brechenden Substanzen sich so einstellt, daß das Bild des Gegenstandes gerade auf die Fläche falle, in der sich die Sehnerven verzweigen: und dies geschieht dadurch, daß sich die gewölbten Theile des Auges für ferne Gegenstände mehr abflachen, für nahe Gegenstände dagegen mehr krümmen. Diese Fähigkeit des Auges bezeichnet man mit dem Namen des Accommodationsvermögens. Daß man nicht gleichzeitig nahe und ferne Gegenstände deutlich sehen kann, bemerkt man sogleich, wenn man zwischen den gespreizten Fingern hindurch nach einem entfernten Gegenstande blickt: man wird in diesem Falle nur immer entweder den Gegenstand, oder die Finger deutlich sehen, und zugleich

Digitized by Google

fühlt man auch, daß im Auge selbst eine Veränderung vor sich geht, wenn man erst nach dem Gegenstande geblickt hat und darauf die Finger betrachtet. Bringt man einen Gegenstand zu nahe an das Auge heran, so können sich die durchsichtigen Theile nicht mehr stark genug krümmen, um ein starkes Bild auf der Netzhaut entstehen zu lassen; es giebt also für jedes Auge eine Entfernung, innerhalb welcher die Gegenstände nicht mehr deutlich gesehen werden. Eine größte Entfernung, jenseits welcher die Umrisse der Körpes verwaschen erscheinen, giebt es dagegen für ein gesundes Auge nicht. Am deutlichsten erscheinen uns die Körper nicht in der Entfernung, in welcher sie von uns überhaupt noch scharf begrenzt wahrgenommen werden, sondern in etwas größerem Abstande: für ein normales Auge beträgt die deutliche Sehweite etwa 25—30 cm.

Bei manchen Augen, besonders alter Leute, ist die Krümmung der durchsichtigen Theile so gering, daß nur die Strahlen, welche aus einer

Fig. 269. Entstehung des Bildes im Auge eines Weitsichtigen.

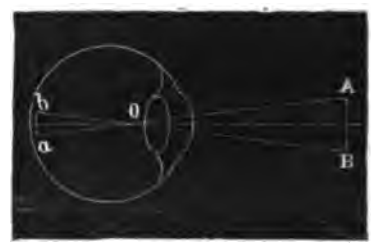


Fig. 270. Entstehung des Bildes im Auge eines Kurzsichtigen.

größeren Entfernung kommen, auf der Netzhaut zu einem Bilde vereinigt werden: das Bild von näher gelegenen Gegenständen würde dagegen hinter die Netzhaut fallen (Fig. 269). Leute, deren Augen diesen Fehler haben, nennt man weitsichtig: wollen dieselben lesen, so müssen sie das Buch in sehr große Entfernung halten, da die Strahlen, welche von einem näher gelegenen Punkte ausgehen, im Auge nicht stark gebrochen werden, sodaß sie sich noch nicht auf der Netzhaut zu einem Bilde vereinigt haben. Entfernt man den Gegenstand vom Auge, so nähert sich nach den früher entwickelten Brechungsgesetzen das Bild der Linse, sodaß es nun auf der Netzhaut selbst deutlich erscheint. Der Fehler der Weitsichtigkeit entsteht entweder dadurch, daß die Krümmung der Linse oder der Hornhaut zu gering ist, oder auch dadurch, daß die Linse nicht beweglich genug ist, um sich auf jede beliebige Entfernung einstellen zu

Digitized by Google

können. Der entgegengesetzte Fehler besteht darin, daß die Theile des Auges das Licht zu stark brechen, sodaß bei nur einiger Entfernung der Körper deren Bilder zu nahe an der Linse liegen und sich somit nicht deutlich auf die Netzhaut projiciren (Fig. 270). Man bezeichnet diejenigen, deren Augen mit diesem Fehler behaftet sind, als kurzsichtige: dieselben sehen sehr nahe Gegenstände deutlich, die Bilder entfernter Gegenstände aber sind ihnen unklar und verschwommen. Durch schlechte Haltung beim Lesen und Schreiben, durch Anstrengung des Auges im Halbdunkel wird dieser Fehler ausgebildet: es verlängert sich der Augapfel in der Richtung seiner Axe und dabei krümmt sich die Hornhaut dauernd so stark, daß sie für entferntere Gegenstände nicht wieder die richtige Stellung annehmen kann. Man sucht beiden Fehlern durch Anwendung von Brillen abzuhelfen, und zwar braucht der Weitsichtige, dessen Auge das Licht zu wenig bricht, Convexbrillen, welche die Divergenz der Strahlen etwas verringern, der Kurzsichtige dagegen Concavbrillen, welche die Divergenz etwas erhöhen.

Man hat die Frage aufgeworfen, wie es wohl komme, daß wir die Körper aufrecht sehen, während doch ihr Bild auf der Netzhaut ein verkehrtes ist, und hat verschiedene, zum Theil ziemlich verwickelte Erklärungen gegeben. Uns scheint die Sache ziemlich einfach: für unsere Wahrnehmung befindet sich jeder Körper in der Richtung, aus welcher die Lichtstrahlen in unser Auge gelangen. Richten wir nun unser Auge zunächst auf den Fuß eines Gegenstandes und darauf auf die Spitze desselben, so müssen wir das Auge heben, die Axe desselben durchläuft einen Winkel, welcher nach oben gerichtet ist, wir sehen also auch die Spitze über dem Fuße und nicht umgekehrt. Die Verwechslung ist nur dadurch entstanden, daß man angenommen hat, man betrachte das auf der Netzhaut entstandene Bild, während sich dasselbe doch nur den Nerven einprägt, und man dadurch die Gegenstände selbst betrachtet.

Der Eindruck, den das Licht auf die Netzhaut macht, verschwindet nicht sofort mit dem Erlöschen der Strahlen: und dies ist der Grund, weshalb wir einen hellen Punkt, der sich schnell bewegt, nicht als Punkt sehen, sondern als Streifen in der Richtung, in welcher die Bewegung erfolgt. Hierauf beruht ja die bekannte Erscheinung, daß, wenn man mit einem glühenden Spahn Kreise in der Luft beschreibt, man diese Kreise in ihrer ganzen Ausdehnung gleichzeitig erblickt; auch mancherlei

Digitized by Google

Spielereien, wie die Zauberscheiben und Anorthoskope beruhen auf dieser Eigenschaft des Auges. Durch ähnliche Experimente hat Plateau die Dauer des Lichteindruckes bestimmt und gefunden, daß dieselbe im Mittel acht Zehntel einer Secunde beträgt, daß das Licht eine gewisse Zeit anhalten muß, ehe der hervorgebrachte Eindruck seinen größten Werth erreiche, und daß die Zeit, die vergeht, ehe dieses Maximum erreicht ist, mit der Lichtstärke umgekehrt proportional ist; die Dauer des Lichteindruckes selbst ist dagegen um so größer, je intensiver das Licht ist.

Digitized by Google

Viertes Buch.

Die Wärme.

Erstes Kapitel.

Ausdehnung der Körper durch Wärme. — Aenderung des Aggregatzustandes.

§ 1. Erscheinungen der Ausdehnung und Zusammenziehung.

Wenn wir mit der Hand irgend einen Körper berühren, so haben wir außer dem Gefühle, das uns die Beschaffenheit der Oberfläche verursacht, häufig noch eine Empfindung eigenthümlicher Art, die sich nicht beschreiben läßt, und die wir als Wärme oder Kälte bezeichnen, eine Empfindung, welche ebensowohl von einem besonderen Zustande, in dem sich der Körper befindet, als auch von der augenblicklichen Beschaffenheit unserer Gefühlsorgane abhängig ist. Denn ein und derselbe Körper ist im Stande, verschiedene Empfindungen derselben Kategorie, ja vollständig entgegengesetzte, in uns hervorzurufen, wenn wir ihn zu verschiedenen Zeiten berühren, entweder, weil er selbst in der Zwischenzeit erwärmt oder abgekühlt worden ist, oder, weil unsere Organe ähnliche Wandelungen erfahren haben, oder endlich aus diesen beiden Gründen. Faßt man mit der einen Hand ein Stück Eis und hält man die andere Hand in Wasser, das so weit erwärmt ist, als es unsere Hand überhaupt ertragen kann, und taucht man hierauf beide Hände gleichzeitig in Wasser von gewöhnlicher Stubenwärme, so wird man an beiden Händen die entgegengesetzten Empfindungen haben: für die Hand, die das Eis gehalten hatte, wird das Wasser den Eindruck der Wärme, für die andere Hand

Digitized by Google

den der Kälte machen. Treten wir aus einem geheizten Zimmer in das Vorhaus, so haben wir das Gefühl der Kälte; kommen wir dagegen in denselben Raum von der Straße, auf welcher gerade ein schneidiger Wind weht, so empfinden wir eine ganz angenehme Temperatur und freuen uns, daß wir uns hier erwärmen können. Betreten wir im härtesten Winter eine gut geheizte Stube, so finden wir leicht die Hitze in derselben erstickend: sinkt in der heißen Jahreszeit die Temperatur plötzlich auf genau denselben Grad, so frösteln wir bei einer Wärme, die uns im Winter unerträglich schien. Unsere Organe gewöhnen sich also allmählich vollständig an einen höheren oder tieferen Temperaturgrad, empfinden aber eine plötzliche Aenderung sehr lebhaft: sie sind daher nicht geeignet, uns über den wahren Werth der Temperatur aufzuklären,

Fig. 271. Ausdehnung einer Kugel durch Wärme.

und wir würden uns nie ein genaues Urtheil über dieselbe bilden können, wenn uns hierzu nicht andere Mittel zu Gebote ständen.

Es galt somit, unter den Wirkungen, welche die Aenderungen der Wärme in festen, flüssigen und gasförmigen Körpern hervorbringt, Erscheinungen aufzufinden, welche so allgemein verbreitet sind und mit solcher Regelmäßigkeit auftreten, daß sie als Vergleichspunkte beim Studium dieser Vorgänge dienen können: Erscheinungen, deren Gang einer sorgfältigen Beobachtung und genauen Messung unterworfen werden kann, ohne daß die persönliche Empfindung des Beobachters in Mitleidenschaft gezogen wird. Eine solche Erscheinung ist nun die Aenderung des Volumen, die alle Körper erleiden, wenn ein Wechsel in ihrer Erwärmung eintritt: mit ganz wenigen Ausnahmen, von denen die meisten auch nur scheinbare Ausnahmen sind, wächst das Volumen jedes Körpers, mag

Digitized by Google

sich derselbe im festen, flüssigen oder luftförmigen Zustande befinden, sobald sich die Temperatur erhöht; bei Temperaturerniedrigungen wird es aber in gleichem Maße kleiner. Diese Thatsache läßt sich durch verschiedene Versuche anschaulich machen, von denen wir jetzt einige der wichtigeren erwähnen wollen.

Erwärmt man eine Metallkugel, welche sich bei gewöhnlicher Temperatur gerade durch einen Metallring hindurchschieben läßt, über einer Spirituslampe, und legt sie dann auf den Ring, so wird sie auf demselben liegen bleiben ohne hindurch zu fallen, und erst wenn sie von ihrer Wärme an den Ring soviel abgegeben hat, daß beide wieder gleiche Temperatur besitzen, gleitet sie durch seine Oeffnung hindurch (Fig. 271). Hätte man dagegen nicht die Kugel, sondern den Ring erwärmt, so läßt sich die Kugel durch denselben viel leichter hindurchschieben, als wenn beide kalt sind: also auch der Ring ist durch die Wärme ausgedehnt und seine Oeffnung vergrößert worden. Erwärmt man endlich Ring und Kugel gleich stark, so ändert sich ihr Größenverhältniß nicht, da sich beide in gleichem Maße ausgedehnt haben. Diesen

Fig. 272. Ausdehnung eines Ringes.

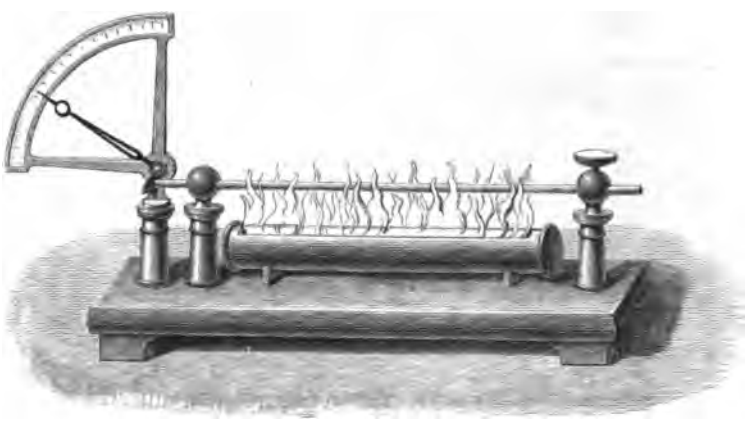


Fig. 273. Lineare Ausdehnung eines Metallstabes.

kleinen Apparat, welchen man als den 'sGravesande'schen Ring bezeichnet, ändert man bisweilen so ab, daß man an Stelle der Kugel einen Metallkegel nimmt, über welchen sich der Ring, wenn beide nicht erwärmt sind, bis zu einer gewissen Weite schieben läßt (Fig. 272). Erwärmt man nun den Kegel, so läßt sich der Ring nicht mehr so weit über ihn hinweg

Digitized by Google

schieben; erwärmt man dagegen den Ring, so gleitet er weiter über den Kegel herab. Aus dem Umstande, daß sich der Ring bei jeder Temperatur genau bis zu derselben Weite über den Kegel hinwegschieben läßt, wenn beide nur gleichen Wärmegrad besitzen, folgt ein wichtiger Satz für die Ausdehnung aller hohlen Gefäße, dieselben mögen cylindrische, kegelförmige, oder irgend welche andere Gestalt besitzen. Die Ausdehnung der Gefäße erfolgt nämlich genau so, als ob auch der ganze innere Hohlraum mit derselben Substanz erfüllt wäre, aus welcher ihre Wände gebildet sind: also auch der Inhalt der Höhlung wächst in demselben Grade, wie sich ein fester Kern ändern würde, der aus dem Stoffe des Gefäßes besteht.

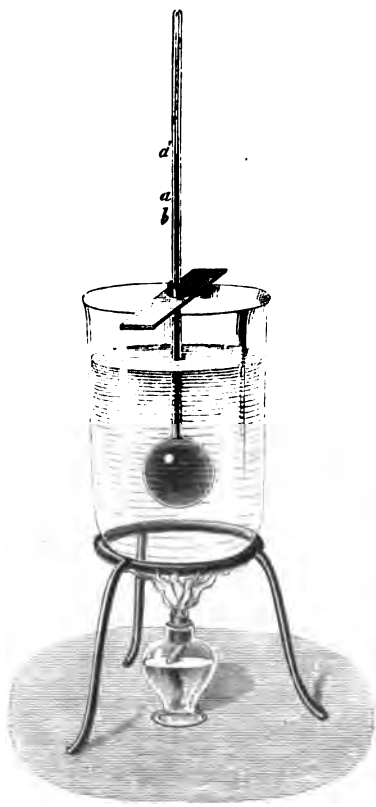


Fig. 274. Ausdehnung der Flüssigkeiten durch Wärme.

Die Ausdehnung der Körper durch die Wärme erfolgt nach allen Richtungen, sodaß sich ein Metallstab nach allen drei Dimensionen: Länge, Breite und Dicke, vergrößert. Will man daher die Ausdehnung bestimmen, so ist wohl zu unterscheiden, ob man nur die Verlängerung des Körpers in einer dieser Richtungen, oder ob man die Vergrößerung des ganzen Volumen berücksichtigt: die letztere nennt man cubische, die erstere, mit welcher wir uns jetzt beschäftigen wollen, dagegen lineare Ausdehnung. Klemmt man einen Metallstab an dem einen Ende fest, während sein anderes Ende frei durch eine Hülse hindurch gleitet, und erwärmt man ihn seiner ganzen Länge nach, so wird er sich nach dem freien Ende hin ausdehnen, was man dadurch bemerklich machen kann, daß man sein freies Ende gegen den kürzeren Schenkel eines Winkelhebels stoßen läßt, dessen längerer Schenkel die Form eines Zeigers besitzt, der auf einem Theilkreise gleitet (Fig. 273). Auf diese Weise lassen sich schon kleine Aenderungen in der Länge des Stabes sehr auffällig machen.

Digitized by Google

In Flüssigkeiten bewirkt die Aenderung der Wärme viel größere Volumenänderungen, als in den meisten festen Körpern, was sich auf folgende Weise zeigen läßt. Füllt man eine Glaskugel, an welche eine offene Röhre angeschmolzen ist, so weit mit einer Flüssigkeit, daß dieselbe in der Röhre etwa bis zum Punkte a (Fig. 274) reicht, und taucht man die Kugel dann in Wasser, welches wärmer ist als die Flüssigkeit, so sieht man zuerst, daß die letztere ein wenig, vielleicht bis zum Punkte b sinkt. Dies rührt daher, daß sich die Wärme zunächst nur dem Glase

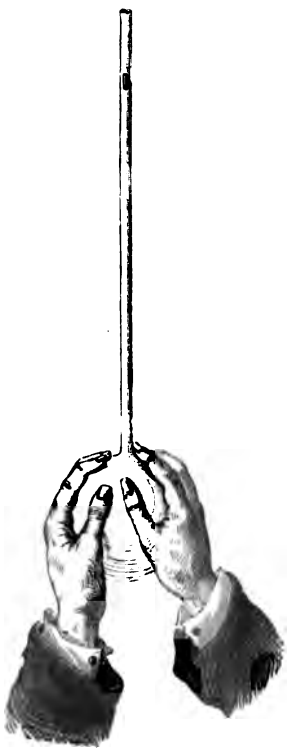


Fig. 275. Ausdehnung der Gase durch Wärme.

Fig. 276. Ausdehnung der Gase durch Wärme.

mittheilt, und daß dadurch der Hohlraum der Glaskugel sich erweitert und mehr Flüssigkeit aufnimmt. Nach kurzer Zeit wird die Wärme aber auch bis in die Flüssigkeit eindringen; dieselbe beginnt sich lebhaft auszudehnen, vielleicht bis zum Punkte a', wo sie stehen bleibt, solange sich die Wärme im Apparate nicht ändert. Läßt man nun das Wasser sich abkühlen, so sinkt auch die Flüssigkeitssäule in der Glasröhre und langt schließlich wieder bei dem Punkte an, von welchem sie ausgegangen

Digitized by Google

war. Nicht alle Flüssigkeiten zeigen bei gleichen Temperaturänderungen auch gleiche Veränderungen des Volumen: bei allen aber, mit Ausnahme einer einzigen, auf die wir bald zu sprechen kommen, wächst das Volumen stets, sobald die Wärme zunimmt.

Noch stärker als die Ausdehnung der Flüssigkeiten ist die der Gase. Man braucht eine gutverschlossene Schweinsblase, die zur Hälfte mit Luft gefüllt ist, nur dem Feuer zu nähern, um zu sehen, wie sich dieselbe allmählich aufbläht. Nimmt man wieder eine Glaskugel mit oben offener Röhre, wie beim vorigen Versuche, bringt man jetzt aber in die Röhre nur einen Tropfen Quecksilber, der dieselbe etwa in der Mitte abschließt, so braucht man die Glaskugel nur mit den Händen zu fassen, um zu sehen, wie der Quecksilbertropfen weiter nach dem Ende der Röhre hin getrieben wird (Fig. 275): die Luft hat sich also schon durch die geringe Erwärmung, welche ihr durch unsere Hände mitgetheilt wurde, in sehr merklicher Weise ausgedehnt. Wendet man eine doppelt gekrümmte Röhre an, welche in ihrem unteren Bogen eine Flüssigkeit enthält (Fig. 276), so macht sich die Ausdehnung der Luft dadurch bemerklich, daß die Flüssigkeit im offenen Schenkel der Röhre in der Richtung von a b steigt, während sie sich im anderen Schenkel senkt.

§ 2. Messung der Temperatur. Die Thermometer.

Die Erscheinung, daß sich alle festen, flüssigen und luftförmigen Körper ausdehnen, wenn sich ihre Wärme vergrößert, daß sie sich dagegen zusammenziehen, wenn dieselbe geringer wird, giebt uns ein bequemes Mittel an die Hand, um den Wärmegrad mit Hülfe der Ausdehnung eines Körpers zu bestimmen. Wenn es uns daher möglich ist, die Veränderungen des Volumen irgend eines Körpers, dessen Masse sich nicht ändert, zu messen, so werden diese Aenderungen uns zugleich als Maßstab für die Temperaturänderungen dienen können: ist das Volumen größer geworden, so ist die Temperatur gestiegen; ist es kleiner geworden, so ist sie gesunken; ist das Volumen auf seinen früheren Werth zurückgekehrt, so wird auch die Temperatur die vorige Höhe wieder erlangt haben.

Am leichtesten lassen sich nun Volumenänderungen an Flüssigkeiten wahrnehmen, welche in Gefäße eingeschlossen sind, die in lange Röhren auslaufen: man benutzt daher auch zur Messung der Temperatur derartige

Digitized by Google

Apparate, die man gewöhnlich mit Quecksilber oder gefärbtem Weingeiste füllt und Thermometer nennt. Ein Quecksilberthermometer (Fig. 277) besteht aus einem kleinen kugelförmigen oder cylindrischen Glasgefäße, das in eine sehr feine Röhre, ein sogenanntes Kapillarröhrchen, ausläuft. Im Innern befindet sich sehr reines Quecksilber, welches noch ein Stück in die Röhre hinaufreicht. Durch stärkeres Erwärmen ist aus dem oberen Theile der Röhre alle Luft ausgetrieben und die Spitze der Röhre darauf zugeschmolzen worden. Da nun der Querschnitt der Röhre im Verhältniß zum Inhalte des Gefäßes ziemlich klein ist, so wird sich auch die geringste Aenderung des Volumen durch ein deutliches Heben oder Senken des Niveau der Quecksilbersäule in der Röhre bemerklich machen. Will man mit diesem Instrumente Messungen anstellen, so muß man zunächst zwei Stellungen des Quecksilberspiegels kennen, welche zwei verschiedenen festen Temperaturen entsprechen: den Zwischenraum zwischen diesen festen Punkten aber theilt man in eine vorher bestimmte Anzahl gleicher Theile, welche man Grade (°) nennt. Es handelt sich also zunächst darum, zwei unveränderliche Temperaturen zu finden, bei welchen das Thermometer die Stellungen einnimmt, die als Hauptpunkte der Scala anzusehen sind, und da ergiebt sich leicht, daß sich einerseits die Temperatur des schmelzenden Eises, andererseits die Temperatur des bei einem Barometerstande von 760^{mm} siedenden Wassers nicht ändert, solange als diese beiden Vorgänge anhalten. Wir haben dadurch zwei feste Punkte, und es fragt sich nur noch, wie wir dieselben auf dem Thermometer markiren.

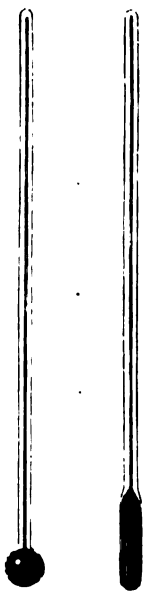


Fig. 277. Gefäß und Röhre eines Quecksilberthermometers.

Fig. 278. Bestimmung des Nullpunktes eines Thermometers durch schmelzendes Eis.

Zunächst füllt man ein Gefäß mit gehacktem Eise und versenkt in dasselbe die Kugel und einen Theil der Röhre des Thermometers, so wird sich nach kurzer Zeit die Quecksilbersäule auf einem bestimmten

Digitized by Google

Punkte einstellen und diesen Stand nicht ändern, solange das Thermometer noch mit den Eisstücken in Berührung ist (Fig. 278). Ist man nun sicher, daß diese feste Stellung erreicht ist, so macht man den Punkt, an welchem sich das Niveau des Quecksilbers befindet, durch einen Strich auf der Röhre kenntlich, und bezeichnet ihn auf einer Scala, die man

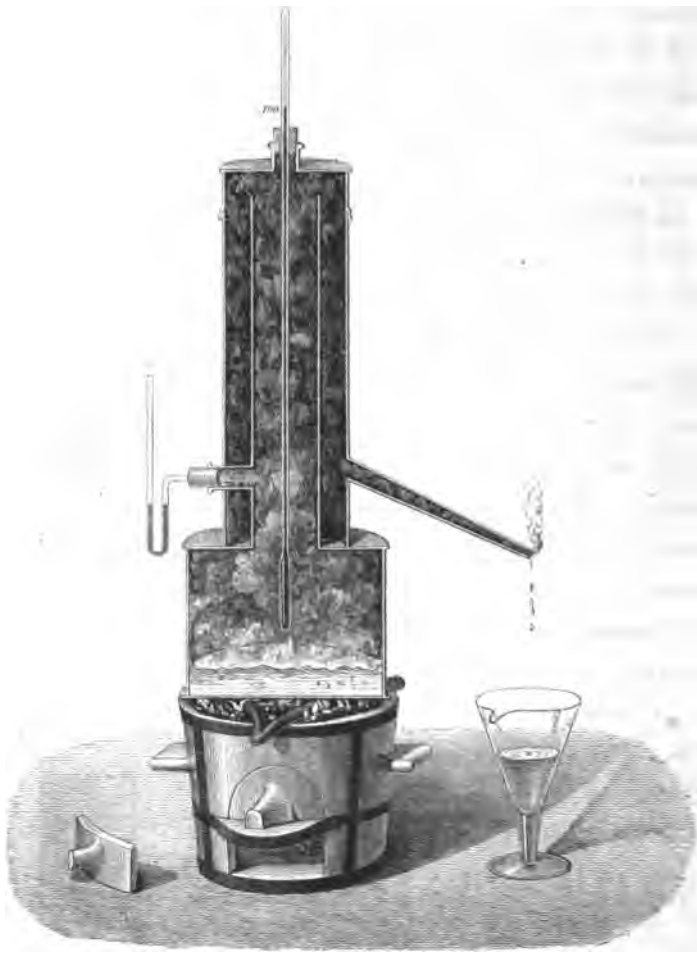


Fig. 279. Bestimmung des Siedepunktes bei einem Thermometer.

später hinter der Röhre befestigt, mit Null. Der Boden des Gefäßes, in dem sich das gehackte Eis befindet, muß durchlöchert sein, damit das Wasser abfließen kann: denn bleibt das Wasser im Gefäße, so ist man nicht sicher, daß nicht die Thermometerkugel nur in dieses Wasser taucht; die Temperatur des Wassers aber, das kein Eis mehr enthält, steigt, bis sie der Temperatur der Umgebung gleich geworden ist.

Digitized by Google

Hierauf bringt man das Thermometer in ein Dampfbad, wie es in Fig. 279 abgebildet ist, sodaß es vollständig in den Dampf des siedenden Wassers eintaucht. Das Gefäß, in welchem man das Wasser sieden läßt, hat eine doppelte Wand aus Eisenblech, sodaß der im innern Theile entwickelte Dampf erst durch den äußeren, ringförmigen Raum circuliren muß, wodurch verhindert wird, daß sich der Dampf im innern Raume durch Ausstrahlung von Wärme in die äußere Luft, abkühle. Wartet man auch hier, bis das Thermometer eine feste Stellung angenommen hat, und markirt diesen Punkt, so kann man, wenn man die Theilung nach Celsius, die jetzt immer gebräuchlicher wird, zu Grunde legt, den Punkt auf der Scala sofort mit 100 bezeichnen, wenn nur der Barometerstand 760^{mm} beträgt: daß auch der Druck des Dampfes im Siederohre dieselbe Größe hat, davon kann man sich durch Beobachtung des Manometers überzeugen, das auf der linken Seite der Abbildung zu sehen ist. Ist der Barometerstand von 760^{mm} verschieden, so muß man an der Ablesung eine kleine Correction anbringen, weil die Temperatur des siedenden Wassers höher ist, wenn der Luftdruck einen größeren Werth besitzt, und umgekehrt: und zwar hat man gefunden, daß bei einem Unterschiede des Barometerstandes von ungefähr 27^{mm} der Unterschied in der Siedetemperatur 1^0 der hunderttheiligen Scala oder nach Celsius (C) beträgt. Läßt man daher das Wasser bei einem Luftdrucke von 733^{mm} sieden, so beträgt die Siedetemperatur nur 99^0, für 787^{mm} dagegen 101^0, und so entsprechend für alle zwischenliegenden Werthe.

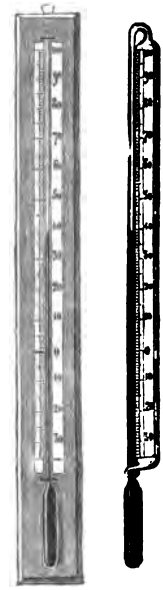


Fig. 280. Hunderttheilige Thermometer mit ihren Scalen.

Der Zwischenraum zwischen den beiden Punkten, die man durch diese beiden Versuche gefunden hat, dem Schmelzpunkte des Eises oder 0^0 und dem Siedepunkt des Wassers oder 100^0, theilt man nun nach Celsius in 100 gleiche Theile oder Grade: vorausgesetzt, daß man sich überzeugt hat, daß die Thermometerröhre vollständig cylindrisch ist, ehe man dieselbe an die Kugel angeschmolzen hat. Diese Prüfung wird dadurch ausgeführt, daß man durch sie einen Tropfen Quecksilber hindurchlaufen läßt und die Länge desselben in jeder einzelnen Lage prüft: hat sich hierbei gezeigt, daß die Weite der Röhre nicht überall die gleiche ist, so

Digitized by Google

muß man bei guten Thermometern die Theilstriche dem entsprechend im weiteren Theilen dichter, im engeren Theile entfernter von einander zeichnen, sodaß immer das zwischen je zwei derselben liegende Stück der Röhre denselben Rauminhalt besitzt. Diese Theilung setzt man noch jenseits des Nullpunktes und des Siedepunktes fort, um auch Temperaturen, die niedriger sind, als die Temperatur des schmelzenden Eises, und solche, die höher sind, als die des siedenden Wassers, am Thermometer ablesen zu können. Die Scala ritzt man entweder auf der Thermometerröhre selbst, oder auf einer an dieselbe angeschmolzenen Röhre ein, oder man verzeichnet sie auf Platten, an denen das Thermometer befestigt wird (Fig. 280).

Die Theilung der Thermometerscala in 100 Grade, welche von Celsius angegeben wurde, ist schon längst in der Wissenschaft im Gebrauche; aber auch im täglichen Leben verdrängt sie immer mehr die bisher sehr verbreitete Theilung nach Réaumur (R), der den Zwischenraum zwischen Schmelzpunkt und Siedepunkt in nur 80° theilte. Die Verwandlung der Angaben nach Réaumur in Grade nach Celsius, und umgekehrt, läßt sich sehr leicht durch folgende Rechnung ausführen: hat man eine Angabe nach Réaumur, so braucht man nur den vierten Theil der Grade zu addiren, um die Angabe nach Celsius zu erhalten: 28^0 R $= 28 + 7 = 35^0$ C; 17^0 R $= 17 + 4^1/_4 = 21{,}25^0$ C; umgekehrt, um Angaben nach Celsius in Grade nach Réaumur zu verwandeln, zieht man von der ersten Zahl ihren fünften Theil ab: 35^0 C $= 35 - 7 = 28^0$ R; 32^0 C $= 32 - 6{,}4 = 25{,}6^0$ R.

Bei der Theilung nach Fahrenheit, welche noch jetzt in England und Nordamerika im Gebrauche ist, zerfällt der Raum zwischen Schnielzpunkt und Siedepunkt in 180 Grade, der Nullpunkt aber ist um 32 dieser Grade tiefer gelegt, als der Schmelzpunkt des Eises, an eine Stelle, wo eine Mischung aus gleichen Theilen Schnee und Salmiak schmilzt, sodaß also der Schmelzpunkt des Eises mit 32^0, der Siedepunkt des Wassers mit 212^0 bezeichnet wird. Will man daher eine Angabe nach Fahrenheit in Grade nach Celsius verwandeln, so hat man erst 32^0 abzuziehen, den Rest aber mit $^5/_9$ zu multipliciren: soll man z. B. 120^0 F verwandeln, so giebt die Subtraction 88^0, und diese Zahl multiplicirt mit $^5/_9 = 48^8/_9{}^0$ C. Umgekehrt hat man die Grade nach Celsius erst mit $^9/_5$ zu multipliciren und zur gefundenen Zahl 32 zu addiren: 45^0 C $=$

Digitized by Google

$45 \times {}^{9}/_{5} + 32 = 81 + 32 = 113^{0}$ F. In Rußland endlich ist noch die Scala nach Delisle gebräuchlich, bei welcher der Siedepunkt mit 0^{0}, der Schmelzpunkt des Eises dagegen mit 150^{0} bezeichnet. Die Vergleichung der erwähnten vier Scalen ergiebt sich leicht aus Fig. 281: wir werden bei allen Temperaturangaben nur die Theilung nach Celsius oder die Centesimaltheilung zu Grunde legen.

Wenn man eine Temperaturangabe macht, so ist nothwendig hinzuzufügen, ob die Grade oberhalb oder unterhalb des Nullpunktes gerechnet werden: in der Physik macht man dies dadurch bemerklich, daß man die Temperaturen über dem Nullpunkte als positiv, die unter dem Nullpunkte als negativ ansieht, und deshalb die ersteren mit dem Zeichen +, die letzteren mit — versieht.

Alle Thermometer, welche wir bisher erwähnt haben, geben die Temperatur durch die Ausdehnung des Quecksilbers, das in einer Glasröhre eingeschlossen ist, an: hierbei darf man aber nicht vergessen, daß, wenn die Temperatur steigt, sich nicht nur das Volumen des Quecksilbers vergrößert, sondern daß zugleich der Hohlraum des Glases sich erweitert. Dehnte sich nun das Glas in demselben Grade aus, wie das Quecksilber, so könnte das Thermometer nicht steigen, und wenn auch die Temperatur noch so hoch würde: in Wirklichkeit aber ist die Ausdehnung des Quecksilbers etwa siebenundeinhalbmal so groß, als die des Glases, sodaß bei steigender Temperatur

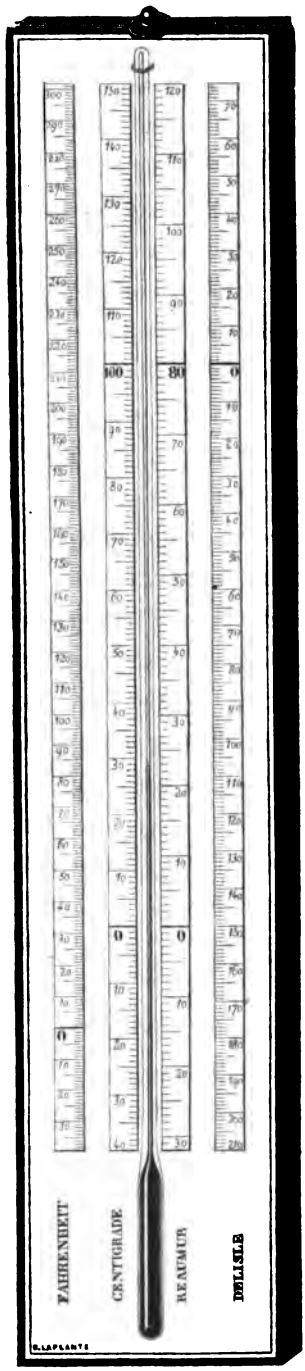


Fig. 281. Vergleichung der Thermometerscalen.

Digitized by Google

auch das Queckſilber in der Glasröhre ſteigen muß, wenn auch nicht ſo ſtark, als wenn ſich das Glas gar nicht ausdehnte. Was man alſo ſucht, das iſt nicht die wahre, ſondern nur die ſcheinbare Ausdehnung des Queckſilbers, nur der Unterſchied zwiſchen ſeiner Ausdehnung und der des Glaſes. Da man nun aber annehmen kann, daß die Ausdehnung ſowohl des Glaſes, als auch des Queckſilbers innerhalb der Grenzen, in denen ſich die Temperatur gewöhnlich bewegt, ganz gleichmäßig erfolgt, ſo werden auch immer die Angaben verſchiedener Thermometer übereinſtimmen müſſen, wenn dieſelben nur ſorgfältig gearbeitet ſind und für jedes die Theilung der Scala ſich auf die beiden Fundamentalverſuche gründet. Nur bei etwas höheren Temperaturen dehnen ſich die einzelnen Glasſorten nicht in ganz gleichem Maße aus, und in dieſem Falle muß man wenigſtens dafür ſorgen, daß die Kugeln der Thermometer aus demſelben Glaſe verfertigt ſind, wenn man die Angaben derſelben mit einander vergleichen will.

Soll ein Thermometer ſich bald auf die Temperatur einſtellen, der es ausgeſetzt iſt, ſo iſt es nothwendig, daß die Wärme in kurzer Zeit die ganze Maſſe des Queckſilbers durchdringen kann: zu dieſem Zwecke muß die Wand des Gefäßes möglichſt dünn ſein, das Queckſilber aber eine möglichſt große Oberfläche beſitzen: deshalb giebt man dem Gefäße lieber die Form eines Cylinders, als die der Kugel, oder man wendet ſtatt des Gefäßes eine Röhre an, welche man in mehrere Spiralwindungen krümmt. Beſonders wenn man Temperaturänderungen beobachten will, welche ſchnell wechſeln, iſt eine ſolche Beſchaffenheit des Gefäßes zu empfehlen. Will man dagegen dem Thermometer einen ſehr hohen Grad von Empfindlichkeit verleihen, d. h. will man ſchon ſehr geringe Aenderungen der Temperatur durch eine Bewegung des Niveau in der Röhre erkennen, alſo noch ſehr geringe Bruchtheile eines Grades ableſen, dann muß das Gefäß im Verhältniß zum Durchmeſſer der Röhre einen ziemlich großen Inhalt beſitzen. Walferdin hat Thermometer von außerordentlicher Empfindlichkeit conſtruirt, an welchen ſich der hundertſte Theil eines Grades erkennen ließ: wollte man dieſe Thermometer für ſehr verſchiedene Temperaturen anwenden, ſo mußte man die Queckſilbermenge für jeden einzelnen Fall zuvor reguliren: für niedrige Temperaturen mußte man Queckſilber nachfüllen, für hohe dagegen etwas davon ausfließen laſſen.

Digitized by Google

Für Temperaturen, die sich 360° über dem Schmelzpunkt des Eises nähern, ist das Quecksilberthermometer nicht mehr zu brauchen, weil sich dann jene Flüssigkeit ihrem Siedepunkte nähert, und dadurch ihre Ausdehnung eine unregelmäßige wird; wollte man die Erwärmung noch weiter fortsetzen, dann würden die Dämpfe, die sich aus dem Quecksilber entwickeln, das Glasgefäß zersprengen. Ebenso versagt das Thermometer seinen Dienst, wenn die Temperatur bis gegen — 35° herabsinkt, weil dann das Quecksilber bald den Punkt erreicht, wo es zu einer festen Masse erstarrt. Jenseits dieser Grenzen muß man daher zur Bestimmung der Wärmegrade andere Mittel ergreifen, und zwar ist für niedrige Temperaturen ein sehr einfaches Verfahren, daß man das Thermometer mit gefärbtem Weingeiste, statt mit Quecksilber füllt. Bei solch einem Thermometer läßt sich nun zwar der Nullpunkt durch das früher erwähnte Verfahren bestimmen, nicht aber der Siedepunkt, da der Weingeist selbst schon bei einer viel niedrigeren Temperatur siedet, als Wasser. Will man ein solches Thermometer graduiren, so hängt man es neben Quecksilberthermometer in Wasser, das man allmählich erwärmt oder abkühlt, und notirt auf ihm die Grade, welche die Quecksilberthermometer angeben. In der Regel werden aber solche Thermometer immer von einem Normalthermometer beträchtliche Abweichungen zeigen, da sich der Weingeist ziemlich unregelmäßig ausdehnt.

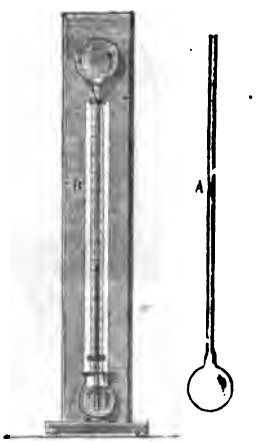


Fig. 282. Luftthermometer nach Cornelius Drebbel und nach Galilei.

Weiter lassen sich auch Apparate construiren, bei denen die Aenderungen der Temperatur durch Ausdehnung und Zusammenziehung der Luft bemerklich gemacht werden; und zwar beruhten die ersten Apparate, welche zur Messung der Wärme gebraucht wurden, auf diesem Principe. So construirte schon Galilei ein Thermometer (Fig. 282, rechts) das aus einer Glaskugel bestand, an welcher eine Glasröhre angeschmolzen war; in dieser Röhre wurde die innere Luft durch einen Quecksilbertropfen, einen sogenannten Index abgesperrt, welcher durch seine Stellung die Veränderung im Volumen der Luft und dadurch die Aenderung der Temperatur anzeigt. Auch der andere in Fig. 282 abgebildete Apparat, welcher von Drebbel erfunden wurde und das erste Thermometer war,

Digitized by Google

das überhaupt zur Anwendung kam, besteht aus einer Glaskugel und Röhre, welche mit ihrem offenen Ende in eine Flüssigkeit taucht, die auch ein Stück der Röhre noch erfüllt: über der Flüssigkeit aber befindet sich Luft, deren Volumen sich beim Wechsel der Temperatur ändert, was sich durch Steigen und Fallen der Flüssigkeitssäule bemerklich macht, indem der äußere Luftdruck die Flüssigkeit immer wieder in die Röhre hineinpreßt, sobald die Luft sich durch Abkühlung zusammengezogen hat. An beiden Apparaten lassen sich die Aenderungen der Temperatur sehr leicht wahrnehmen, weil sich die luftförmigen Körper viel stärker ausdehnen, als die flüssigen und festen; bei beiden Apparaten ist aber der

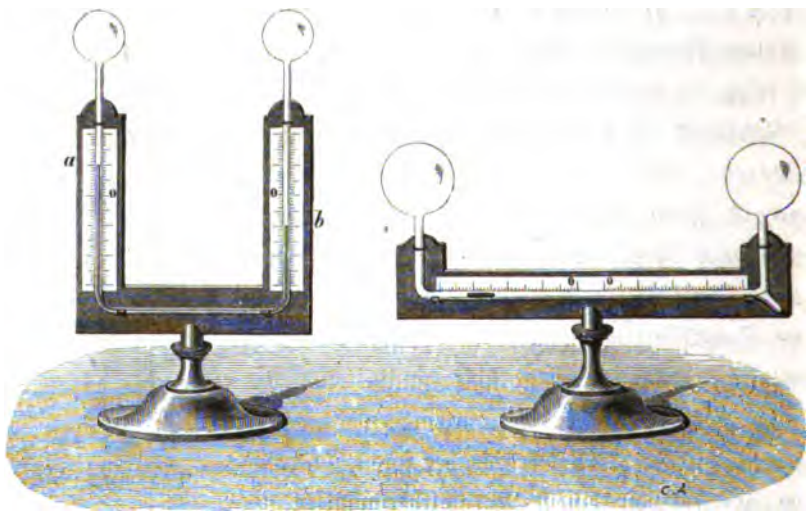


Fig. 283. Differentialthermometer nach Leslie und Rumford.

Uebelstand vorhanden, daß auch schon Aenderungen in der Stärke des Luftdruckes das Volumen der eingeschlossenen Luft abändern, sodaß die Beobachtungen mit diesen Instrumenten erst eine Correction nach dem Luftdrucke erfahren müssen.

Um Temperaturunterschiede anzugeben, haben Leslie und Rumford Apparate construirt, bei denen der Wärmegrad auch durch Ausdehnung einer Luftmenge bestimmt wird, welche aber vom Drucke der äußeren Luft nicht beeinflußt wird (Fig. 283). Beide Instrumente bestehen aus einer doppelt gebogenen Glasröhre, an welcher an jeder Seite eine Glaskugel angeschmolzen ist. Beim Thermometer von Leslie enthält die Röhre eine Säule von rothgefärbter Schwefelsäure, welche auf beiden Seiten gleich hoch steht, wenn die Temperatur der Kugeln dieselbe ist:

Digitized by Google

erwärmt man dagegen die eine der beiden Kugeln, so wird die Flüssigkeit durch die Ausdehnung der Luft zurückgedrängt, sodaß sie auf dieser Seite etwa bis b herabsinkt, während sie auf der andern Seite sich bis a erhebt. Aus dem Abstande der Punkte, in denen sich jetzt das Niveau befindet, auf der einen Seite unter, auf der andern über dem Nullpunkte, läßt sich der Unterschied in der Temperatur beider Kugeln bestimmen. Das Thermometer nach Rumford unterscheidet sich vom vorhergehenden nur dadurch, daß der horizontale Theil der Röhre verhältnißmäßig viel länger ist, und daß die Flüssigkeit nur aus einem kurzen Quecksilberfaden besteht, welcher sich genau in der Mitte der Röhre befindet, sobald beide Kugeln gleiche Temperatur besitzen. Da sich mit diesen Instrumenten nicht der absolute Werth der Temperatur bestimmen läßt, sondern nur der Unterschied der Erwärmung beider Kugeln, so nennt man dieselben Differentialthermometer.

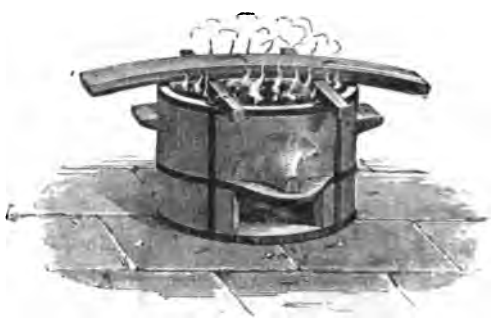


Fig. 284. Verschiedene Ausdehnung zweier Metalle.

Wir haben erwähnt, daß beim Quecksilberthermometer die Temperatur streng genommen nur durch den Unterschied in der Ausdehnung des Quecksilbers und des Glases gemessen wird: auch durch die Thatsache, daß sich feste Körper in verschiedenem Grade ausdehnen, lassen sich Vorrichtungen construiren, durch welche man die Temperatur bestimmen kann. Befestigt man zwei Metallstangen, z. B. eine Stange aus Kupfer und eine aus Zink, der ganzen Länge nach an einander, und erwärmt man diesen zusammengesetzten Stab, so muß sich derselbe krümmen, sobald sich das eine Metall stärker ausdehnt als das andere (Fig. 284). Im vorerwähnten Beispiele ist Zink das ausdehnsamere Metall und deshalb krümmt sich der Stab beim Erwärmen nach der Seite des Kupfers: kühlt sich der Stab wieder bis zur ursprünglichen Temperatur ab, so wird er wieder gerade, und bei noch stärkerer Abkühlung krümmt er sich nach der entgegengesetzten Seite. Sind die beiden Metallstreifen schon von Anfang an gebogen, und zwar so, daß das ausdehnsamere Metall nach Außen liegt, so wird bei steigender Temperatur die Krümmung stärker, bei sinkender schwächer.

Digitized by Google

Auf dieser Eigenschaft beruhen die Metallthermometer: man setzt einen Bügel aus einem Stahl- und einem Kupferstreifen, welche auf einander gelöthet und zu einem Kreise gebogen sind, zusammen und befestigt das eine Ende in einem Punkte einer Dose, während das andere Ende an den kürzeren Arm eines Hebels stößt, dessen längerer Arm einen Kreisbogen mit Zähnen trägt; diese Zähne greifen wieder in ein kleines Rad ein, dessen Axe einen Zeiger trägt, der sich über der Theilung eines Kreises bewegt (Fig. 285). Durch die Aenderungen der Temperatur wird sich der Bügel bald mehr erweitern, bald mehr verengern, und jede dieser Bewegungen überträgt sich auf den Zeiger, welcher sich darnach auf verschiedene Theilstriche des Kreises einstellt: die Theilung des Kreises bestimmt man durch Vergleichung mit einem Quecksilberthermometer.

Fig. 285. Metallthermometer in Dosenform.

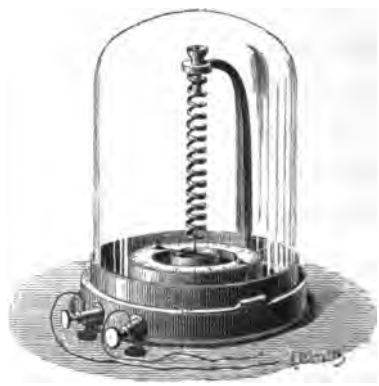


Fig. 286. Metallthermometer nach Breguet.

Beim Metallthermometer nach Breguet (Fig. 286), besteht der Streifen aus Silber, Gold und Platin und ist in einer Schraubenlinie so aufgewunden, daß das Silber, das ausdehnsamste der drei Metalle, die Außenseite der Windungen einnimmt: die Spirale ist senkrecht aufgehängt und trägt an ihrem unteren Ende eine horizontale Nadel, welche die Theilung eines Kreises durchläuft. Steigt die Temperatur, so werden die einzelnen Windungen enger, weil sich das Silber, das sich an der Außenseite befindet, am stärksten ausdehnt, und der Zeiger bewegt sich nach der einen Seite hin; nach der entgegengesetzten Seite aber bewegt er sich beim Sinken der Temperatur. Da die Metallstreifen außerordentlich fein sind, so wirkt jede Aenderung der Temperatur sehr schnell durch die ganze Masse hindurch, sodaß dieses Instrument plötzliche Tem-

Digitized by Google

peraturänderungen fast augenblicklich anzeigt; und außerdem ist es auch wegen der Feinheit seiner Theile im höchsten Grade empfindlich.

Um sehr hohe Temperaturen, z. B. die der Hohöfen und Schmiedefeuer, zu messen, gebraucht man Instrumente, welche man mit dem Namen Pyrometer bezeichnet, auf deren Beschreibung wir aber hier nicht eingehen können: wir wollen nur erwähnen, daß sie sich theils auf die Ausdehnung der Metalle, theils auf eine Eigenthümlichkeit des Thones gründen, dessen Volumen bei hohen Hitzgraden ein immer kleineres wird. Auf diese letztere Erscheinung, die man als eine Ausnahme von dem Gesetze der Ausdehnung ansehen könnte, kommen wir später noch einmal zu sprechen. Die Angaben der Pyrometer mit denen der Quecksilberthermometer in Einklang zu bringen, ist bisher noch nicht gelungen, und daher sind auch die Angaben derselben nicht übermäßig zuverlässig: will man für höhere Temperaturen größere Genauigkeit haben, so muß man auch in diesem Falle die Ausdehnung von Luftmassen zu Hülfe nehmen.

Alle Thermometer, welche wir bisher beschrieben haben, zeigen streng genommen nur die Temperatur der Stoffe an, welche sich bei ihnen ausdehnen, während man sie doch anwendet, um die Temperatur der festen, flüssigen oder luftförmigen Körper kennen zu lernen, mit denen man sie in Berührung bringt; will man daher von jenen Angaben auf diese Werthe einen einigermaßen sicheren Schluß machen, so sind mehrere Vorsichtsmaßregeln erforderlich. Handelt es sich um die Temperatur eines luftförmigen Körpers oder einer Flüssigkeit, so taucht man das Thermometer vollständig in das Mittel ein: ist dasselbe nur empfindlich genug und ist seine Masse nur klein im Vergleiche mit der Masse des Körpers den man untersuchen will, so darf man wohl annehmen, daß die Temperatur, welche das Thermometer anzeigt, wenn sein Stand ein fester geworden ist, mit der Temperatur des Mittels übereinstimmt. Will man die Temperatur eines festen Körpers untersuchen, so bringt man in demselben eine Höhlung an, groß genug, um wenigstens die Kugel des Thermometers in dieselbe zu versenken: besser noch, man füllt diese Höhle mit Quecksilber und taucht in dieses nach einiger Zeit das Thermometer, wenn man erst annehmen kann, daß das Quecksilber die Temperatur des festen Körpers angenommen hat. In jedem Falle ist es nothwendig, daß das Thermometer im Vergleich mit den Massen, deren Temperatur man bestimmen will, nur klein sei: denn da zwischen zwei Körpern, die

Digitized by Google

sich berühren, ein beständiger Ausgleich der Wärme stattfindet, so wird auch ein Thermometer nicht die Temperatur anzeigen, welche die Masse ursprünglich besaß, sondern diejenige, welche erst durch den Ausgleich mit der Temperatur des Thermometers sich gebildet hat. Soll diese Angabe also nicht gar zu fehlerhaft sein, so darf das Thermometer nicht zu viel Masse besitzen: ganz vermeiden läßt sich dieser Fehler niemals, und man muß schon zufrieden sein, wenn man ihn auf ein möglichst geringes Maß gebracht hat.

§ 2. Messung der Ausdehnung fester Körper.

Wir haben als eine allgemeine gültige Thatsache erwähnt, daß sich die Körper ausdehnen, wenn sie erwärmt werden, und es entsteht nun die weitere Frage, in welchem Maße diese Ausdehnung erfolgt, d. h. um welchen Bruchtheil ihr Volumen wächst, wenn die Temperatur um einen Grad zunimmt; und weiter, ob die Volumenänderung für alle Körper von gleicher Größe ist, und ob sie für ein und denselben Körper bei allen Temperaturen dieselbe bleibt. Ehe wir zu der Antwort auf diese Frage, welche die Beobachtung ergeben hat, übergehen, wollen wir an einigen Beispielen den Nutzen zeigen, den die genaue Kenntniß dieser Wirkungen gewährt, sowie die Nothwendigkeit daß man sie im Voraus beachtet und in Rechnung zieht.

Unterwirft man einen zerbrechlichen Körper, in welchem sich die Wärme nur langsam ausbreiten kann, einer plötzlichen Aenderung der Temperatur, so wird in der Regel der Erfolg der sein, daß er zerbricht: so springt ein Glas, wenn es mit einem glühenden Gegenstande in Berührung kommt und ebenso auch, wenn es selbst sehr heiß ist und mit einem kalten Gegenstande berührt wird. Im ersten Falle dehnen sich die Theile des Glases, welche mit dem glühenden Körper in Berührung kommen, plötzlich aus, während die benachbarten Theile noch nicht Zeit gehabt haben sich zu erwärmen, und hierdurch erfolgt eine Trennung derselben; im anderen Falle dagegen ist das Bersten eine Folge der plötzlichen Zusammenziehung der zunächst betroffenen Theile. In gleicher Weise zerspringen kalte Gefäße, wenn heiße Flüssigkeiten in dieselben gegossen werden, und umgekehrt, wenn man in ein heißes Gefäß kaltes Wasser gießt.

Durch die Ausdehnung der Metalle, welche man zu Bauten benutzt,

Digitized by Google

während der heißen Jahreszeit und die Zusammenziehung derselben in der Winterkälte werden Wirkungen hervorgebracht, die um so merklicher sind, je größer der Unterschied zwischen der Ausdehnung der Metalle und derjenigen Stoffe ist, mit denen die Metalle in Verbindung gesetzt sind. Tyndall erwähnt hierzu in seinem Werke über die Wärme ein merkwürdiges Beispiel, welches Moselly beobachtet hat und wofür derselbe eine Erklärung giebt: „Das Dach des Chores der Kathedrale zu Bristol besteht aus Bleiplatten; seine Länge beträgt sechzig Fuß, seine Höhe 19 Fuß 4 Zoll. Im Jahre 1851 war es gelegt worden, und zwei Jahre später, also 1853, war es um 18″ herabgerutscht, und diese Bewegung hatte begonnen, fast unmittelbar nachdem es vollendet war. Vergebens versuchte man, es auf seinem Wege durch Nägel aufzuhalten, welche man in die Dachsparren einschlug: die Kraft, welche es fortzog, war so groß, daß die Nägel mit Gewalt herausgerissen wurden. Die Neigung des Daches war nicht sehr stark, sodaß das Gewicht des Bleies nicht die Ursache für das Herabgleiten sein konnte; sondern der Grund hierfür lag nur darin, daß das Blei dem Wechsel der Temperatur des Tages und der Nacht ausgesetzt war. Während des Tages wurde es durch die Wärme ausgedehnt: hätte es nun auf einer horizontalen Ebene gelegen, so würde diese Ausdehnung nach allen Seiten in gleicher Stärke erfolgt sein; auf einer geneigten Ebene dagegen ist sie an der unteren Seite größer, als an der oberen. Wenn sich dagegen während der Nacht das Blei durch Abkühlung zusammenzieht, so wird dieser Rückgang am oberen Rande beträchtlicher sein, als am unteren. Die Bleiplatten führten also eine Bewegung aus, genau wie ein Regenwurm. Am Tage schoben sie ihren unteren Rand vor, und zogen des Nachts den oberen nach; die Temperaturänderungen bei Tage und bei Nacht wirkten also in demselben Sinne. Indem die Platten in solcher Weise langsam weiterkrochen, war das Dach in zwei Jahren um 18″ herabgerückt.“

Man sieht aus diesem Beispiel, wie nothwendig es ist, bei den Bauten, wie überhaupt in der Industrie, der Ausdehnung fester Körper Rechnung zu tragen. So dehnen sich auch die Schienen der Eisenbahnen im Sommer aus und ziehen sich im Winter wieder zusammen: daher muß ihnen beim Legen ein Spielraum gelassen werden, welcher gestattet, daß sie sich genügend ausdehnen können: ohne solchen Spielraum würden sie die Nägel aus den Schwellen ausheben oder in anderer Weise den

Digitized by Google

Weg umgestalten; und wohl möglich, daß manche Entgleisung dadurch verursacht worden ist, daß man jene Vorsichtsmaßregeln außer Acht gelassen hat.

Sind Steine durch eiserne Klammern mit einander verbunden, so werden sie bisweilen gesprengt, wenn sich das Metall in der Wärme ausdehnt, oder auch, wenn es sich in der Kälte zusammenzieht, da beide Aenderungen beim Eisen größer sind, als beim Steine. Die Kraft, mit welcher sich die Molecüle von einander entfernen oder sich nähern wollen, ist eine ungeheure: wird eine Eisenstange, die bei 0° einen Meter lang ist, bis auf 100° erwärmt, so vergrößert sich ihre Länge um 1,17 mm, und um ebensoviel verringert sich dieselbe, wenn Abkühlung von 100° bis 0° stattfindet: wollte man nun jene Ausdehnung oder diese Zusammenziehung verhindern, so müßte man bei einer Stange von 1 Quadratcentimeter Querschnitt im ersten Falle einen Druck, im anderen einen Zug von 2450 Kilogramm anwenden, bei einem Querschnitte von 1 Quadratdecimeter aber müßte diese Kraft 245000 Kgr. betragen. Man hat diese bedeutende Kraft angewendet, um die Seitenwände eines Saales im Conservatorium der Künste und Gewerbe zu Paris, welche sich beim Aufsetzen der Wölbung etwas von einander entfernt hatten, wieder in die senkrechte Richtung zu bringen. Man legte starke eiserne Barren quer herüber und ließ dieselben durch Oeffnungen der gegenüberstehenden Mauern hindurchgehen; die vorspringenden Enden versah man mit Schraubenwindungen, über welche sich Schraubenmuttern bis dicht an die Mauern heranschrauben ließen. Nun erhitzte man die Barren ihrer ganzen Länge nach, sodaß sie sich ausdehnten und die Schraubenmuttern sich von den Mauern entfernten: nachdem man dieselben hierauf nachgezogen hatte, ließ man die Barren sich abkühlen, wobei sie auf die Mauern einen so gewaltigen Zug ausübten, daß diese nach mehrmaliger

Fig. 287. Mauern, welche durch die Zusammenziehung des Eisens aufgerichtet wurden.

Digitized by Google

Wiederholung die senkrechte Lage wieder einnahmen (Fig. 287). Auch die Wagner benutzen die Zusammenziehung des Eisens um die Radkränze an den Felgen zu befestigen: sie fertigen eiserne Ringe, welche bei gewöhnlicher Temperatur ein wenig zu eng sind, als daß sie um das Rad gelegt werden könnten. Werden dieselben dagegen erhitzt, so kann man sie über das Rad schieben, an welches sie sich engstens anschließen, wenn sie sich beim Abkühlen zusammenziehen.

Läßt man einen Tropfen geschmolzenen Glases in sehr kaltes Wasser fallen, so erstarrt er plötzlich und nimmt die Form einer Birne an, die in einem Faden endigt: hierbei ist aber die Erstarrung der äußersten Schichten so schnell erfolgt, daß dieselben schon fest waren, als sich die inneren Theile noch im flüssigen Zustande befanden. Wenn sich nun allmählich auch diese abkühlen und in den festen Zustand übergehen, so wollen sie sich weiter zusammenziehen, können aber dieser Kraft nicht Folge leisten, da das Volumen des Körpers durch die früher erstarrten äußeren Schichten bereits fest bestimmt ist. Die Molecüle befinden sich daher in einer Art Spannung, indem sie sich in bestimmten Richtungen bewegen wollen und doch daran durch den Zusammenhalt der äußeren Theile gehindert werden. Stört man nun aber irgendwo das Gleichgewicht, so erfolgt sofort die Molecularbewegung durch die ganze Masse hindurch und der ganze Körper, den man eine Glasthräne nennt, zerfällt in feinen Staub. Die Heftigkeit der Bewegung ist hierbei so groß, daß, wenn man die Thräne unter Wasser zersprengt, das sich in einer Flasche befindet, die Flasche selbst zerbricht. Dieselbe Erscheinung zeigt sich auch bei sehr starken Glasflaschen, die schnell gekühlt sind, sogenannten Bologneserfläschchen: wirft man in diese einen kleinen Splitter eines Feuersteins und schüttelt man denselben, sodaß er irgendwo das Glas ein wenig ritzt, so fällt mit einem Male der ganze Boden aus der Flasche.

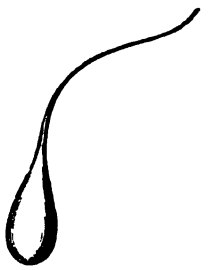


Fig. 288. Glasthräne.

Ist uns das Volumen eines Körpers bekannt und erwärmen wir den Körper um 1° C, so wird er sich um eine ganz bestimmte Größe ausdehnen: bestimmen wir diese Größe als einen Bruchtheil des ursprünglichen Volumen, so nennen wir diesen Bruch den cubischen Ausdehnungscoëfficienten des Stoffes, aus dem der Körper besteht, für 1°. Nimmt man z. B. bei 0° ein Liter Quecksilber und erwärmt

Digitized by Google

man es bis auf 1°, so haben sorgfältige Beobachtungen ergeben, daß es nun einen Raum von 1,000179 L. einnimmt, es hat sich also um 0,000179 L. ausgedehnt, und, da sein ursprüngliches Volumen 1 L. betrug, so ist 0,000179 der cubische Ausdehnungscoëfficient des Quecksilbers bei 0°. So findet man für jeden Stoff einen anderen Ausdehnungscoëfficienten, aber nicht allein für die einzelnen Substanzen sind dieselben von verschiedener Größe, auch für jeden einzelnen Stoff ändern sie sich mit der Temperatur. Für Gase und Flüssigkeiten giebt man in der Regel den cubischen Ausdehnungscoëfficienten an, während man bei festen Körpern lieber den linearen Ausdehnungscoëfficienten bestimmt, d. h. den Zuwachs in einer Dimension bei 1° Temperaturerhöhung, ausgedrückt in einem Bruche der ursprünglichen Länge, da sich derselbe bei festen Körpern leichter beobachten läßt. Uebrigens ergiebt eine einfache mathematische Ueberlegung, daß der cubische Ausdehnungscoëfficient dreimal so groß ist, als der lineare, wenn beide kleine Brüche sind, was bei festen und auch flüssigen Körpern wenigstens immer der Fall ist.

Um die lineare Ausdehnung eines Metallstabes AB (Fig. 289) zu bestimmen, wandten Lavoisier und Laplace folgendes Verfahren an: sie stemmten den Stab mit dem einen Ende A gegen eine feste Wand, sodaß er sich nur nach der Seite des anderen Endes B hin ausdehnen kann. Bei dieser Ausdehnung stößt das Ende B einen Hebelarm OB weiter, wodurch ein Fernrohr LL in eine neue Lage L'L' gedreht wurde: war dieses Rohr erst auf dem Punkt C eines Maßstabes gerichtet, so wird man nun den weiteren Theilstrich C' in ihm erblicken. Eine Vergleichung der Dreiecke ergiebt sehr leicht, daß die Verlängerung BB' zur Entfernung der Theilstriche CC' in demselben Verhältnisse steht, wie der Hebelarm OB zum Abstande OC der Scala vom Drehpunkte des Fernrohres. Kennt man daher dieses Verhältniß, so läßt sich aus der Linie CC' die Verlängerung BB' sehr leicht berechnen.

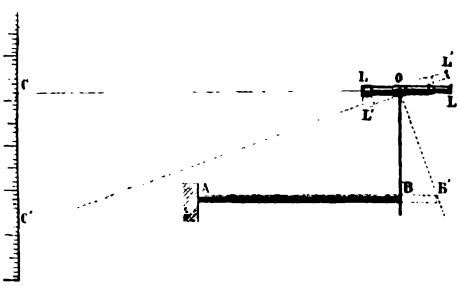


Fig. 289. Bestimmung der linearen Ausdehnung eines Metallstabes. Princip der Methode von Lavoisier und Laplace.

Digitized by Google

Fig. 290 zeigt die ganze Anordnung des Apparates, wie ihn Lavoisier und Laplace anwendeten: in einem länglichen Gefäße C, das mit Wasser gefüllt werden kann, und unter dem sich eine Heizung zum Erwärmen des Wassers befindet, liegt die Metallstange S, deren Ausdehnung man bestimmen will. Diese Stange stößt auf der einen Seite gegen eine Glasplatte B', die fest mit den Pfeilern des Apparates verbunden ist, auf der andern gegen eine Platte B, welche an der Axe, um die sich das Fernrohr LL' dreht, befestigt ist. Man füllt den Apparat zunächst

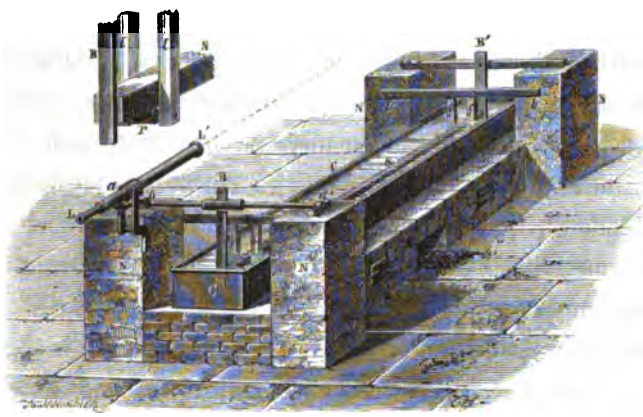


Fig. 290. Apparat nach Laplace und Lavoisier zur Bestimmung der linearen Ausdehnung.

mit gehacktem Eise und notirt den Theilstrich, auf den das Fernrohr gerichtet ist; hierauf erwärmt man den Apparat so lange, bis das Wasser, das durch Schmelzen des Eises gebildet ist, siedet, und liest wieder ab. Aus der Entfernung der beiden Theilstriche, die man gefunden hat, sowie aus den bekannten Dimensionen des Apparates, läßt sich nunmehr die Verlängerung der Stange, sowie der Ausdehnungscoëfficient des Metalles leicht bestimmen.

Durch diese Methode haben Laplace und Lavoisier die Ausdehnung vieler fester Körper untersucht und gefunden, daß die Zahlen für verschiedene Körper sehr von einander abweichen, daß sie aber für einen und denselben Körper sich bei Temperaturen, die zwischen 0° und 100° liegen, nicht wesentlich ändern. Wir theilen hier die linearen Ausdehnungscoëfficienten für einige Körper mit, wie sie durch den beschriebenen oder ähnlich eingerichteten Apparat bestimmt worden sind:

Digitized by Google

Eisen	0,0000122	Silber	0,0000191
Stahl, gehärtet	124	Gold	147
„ , nicht gehärtet	108	Platin	088
Kupfer	172	Holzkohle	110
Zinn	217	Granit	090
Blei	286	Marmor	085
Zink	294	Mauerstein	090
Aluminium	222	Glas in Röhren	083
Messing	185	Eis	528

Nicht alle Beobachter haben für manche Stoffe dieselben Ausdehnungscoëfficienten gefunden, sondern die Angaben weichen für mehrere Körper nicht unbeträchtlich von einander ab, sodaß jede Zahl eigentlich nur für das Stück gilt, welches der Prüfung unterworfen wurde. Besonders ist die Art, wie die Molecüle zu einander gelagert sind, von sehr großem Einflusse, und so zeigt z. B. das Eisen einen sehr verschiedenen Grad von Ausdehnung, je nachdem es gegossen, geschmiedet oder durch den Draht gegangen ist. Besitzen feste Körper nach verschiedenen Seiten hin eine verschiedene Structur, so dehnen sie sich auch nach diesen Richtungen hin in ungleicher Stärke aus: trockenes Holz z. B. hat in der Richtung der Fasern einen anderen Ausdehnungscoëfficienten, als in einer Richtung, die senkrecht dagegen ist. Auch bei Krystallen, die das Licht doppelt brechen, ist die Ausdehnung in der Richtung der optischen Axe verschieden von der Ausdehnung senkrecht dagegen: ja an Stelle der Ausdehnung kann sogar in der einen oder der anderen Richtung, wie Mitscherlich und Fizeau gezeigt haben, Zusammenziehung treten, wenn auch das Volumen im Ganzen dabei immer zunimmt. Während der Ausdehnungscoëfficient des Kalkspathes in der Richtung der Axe 29 Millionstel beträgt, findet in der Richtung, die auf ersterer senkrecht steht, Zusammenziehung um 6 Millionstel statt: und ähnliche Beobachtungen sind auch am Smaragd, Orthoklas und anderen Krystallen angestellt worden. Der Unterschied in der krystallinischen Structur nach verschiedenen Richtungen, der sich durch die merkwürdigen Eigenschaften der doppelten Brechung bemerklich machte, zeigt sich also von Neuem durch eine andere, nicht minder interessante Eigenthümlichkeit.

Die eben erwähnten Abweichungen sind noch nicht wirkliche Ausnahmen von der Regel, daß sich die Körper durch Wärme ausdehnen: denn wenn auch bei ihnen in gewissen Richtungen Zusammenziehung stattfindet, so

Digitized by Google

erleidet doch das Volumen eine Ausdehnung. Anders verhält es sich mit dem Jodsilber, von welchem Fizeau nachgewiesen hat, daß es sich wirklich bei wachsender Temperatur, innerhalb eines Zwischenraumes, welcher 80 Wärmegrade umfaßt, zusammenzieht, und daß der Grad der Zusammenziehung oder, wie man sich ausdrückt, der negative Ausdehnungscoëfficient mit steigender Temperatur immer größer wird. Lange Zeit glaubte man, daß sich auch das Eis bei wachsender Temperatur zusammenzöge und somit ebenfalls eine Ausnahme von der allgemeinen Regel mache: allein Brunner hat nachgewiesen, daß die Dichtigkeit dieses Stoffes bei sinkender Temperatur zunimmt, und aus seinen Versuchen wurde der Ausdehnungscoëfficient bestimmt, den wir in der obigen Tabelle anführten, und der noch weit bedeutender ist, als der des Zinkes, des ausdehnsamsten aller Metalle.

Auch die Hölzer und die meisten organischen Substanzen nehmen beim Erhitzen an Volumen ab, wenn sie nicht zuvor vollständig getrocknet sind: kühlt man sie aber wieder ab, so schwellen sie nicht wieder zu ihrem früheren Volumen an; wägt man sie vor und nach dem Erhitzen, so macht sich eine Abnahme des Gewichtes bemerklich. Beim Erhitzen sind also wirklich Stoffe aus dem Holze entwichen, nämlich Wasser, das sich in großer Menge zwischen den Fasern befindet, und dadurch erklärt sich leicht die Abnahme des Volumen. Eine ähnliche Zusammenziehung zeigt auch, wie schon erwähnt, der Thon, und die Erscheinung setzt sich auch dann noch fort, wenn alles freie Wasser aus ihm ausgetrieben ist. Man erklärt den Vorgang dadurch, daß die Bestandtheile eine engere chemische Verbindung mit einander eingehen; denn nach dem Erhitzen hat der Thon ganz andere Eigenschaften angenommen, die er nicht wieder verliert, ebenso wie er sich nicht wieder zu seinem vorigen Volumen ausdehnt: er ist durch das Brennen härter und spröder geworden oder, wie man sagt, verglast.

§ 3. Messung der Ausdehnung der Flüssigkeiten und Gase.

Will man die Ausdehnung einer Flüssigkeit bestimmen, so muß man dieselbe nothwendig in ein Gefäß einschließen, welches selbst beim Erwärmen an Rauminhalt zunimmt: die Größen der Ausdehnung, welche man direct beobachtet, sind daher nicht die wirklichen Aenderungen des

Digitized by Google

Volumen der Flüssigkeit, sondern nur die Unterschiede zwischen diesen Aenderungen und der Ausdehnung des Rauminhaltes des Gefäßes. Mithin muß man die wirklich stattfindende absolute Ausdehnung der Flüssigkeiten von der beobachteten scheinbaren Ausdehnung wohl unterscheiden: man erhält die erstere, wenn man zur letzteren die Ausdehnung des Gefäßes addirt. Ist es gelungen, auf irgend welche Weise die absolute Ausdehnung irgend einer Flüssigkeit z. B. des Quecksilbers, mit Genauigkeit zu bestimmen, so kann man jedes Mal dieselbe zuvor anwenden, um die Ausdehnung des Gefäßes zu bestimmen, die man bei den Messungen benutzen will.

Man gebraucht hierzu Glasgefäße derselben Art, wie sie zur Anfertigung von Thermometern benutzt werden, nur daß man die Röhre derselben an ihrem oberen Ende nicht zuschmilzt. Zunächst füllt man dieselben mit Quecksilber und erwärmt sie bis zu einem gewissen Grade: vergleicht man nun die Höhe bis zu welcher sich das Quecksilber wirklich ausgedehnt hat mit der Höhe, bis zu welcher es sich ausdehnen müßte, wenn sich der Hohlraum nicht erweiterte, so giebt der Unterschied beider Werthe die Ausdehnung des Gefäßes. Ist diese einmal bekannt, so kann man nach Entfernung des Quecksilbers eine andere Flüssigkeit einfüllen, und deren absolute Ausdehnung bestimmen, wenn man zu den beobachteten Werthen die zuvor gefundene Größe der Ausdehnung des Hohlraumes addirt.

Durch diese Versuche haben verschiedene Physiker, besonders Dulong und Petit, und später Regnault nicht allein gefunden, daß sich die Flüssigkeiten bedeutend stärker ausdehnen, als die festen Körper; sondern sorgfältig angestellte Versuche haben auch ergeben, daß die Ausdehnung einer und derselben Flüssigkeit bei verschiedenen Temperaturen sehr ungleiche Werthe besitzt. So beträgt der cubische Ausdehnungscoëfficient des Quecksilbers

im Mittel zwischen 0° und 100°	0,00018170
bei 100°	18506
„ 200°	18909
„ 300°	19413
„ 359°	19666

Man sieht, daß dieser Werth beständig wächst: zwischen 0° und 100° beträgt die Ausdehnung für 1°, welche hier noch ziemlich gleichmäßig ist,

Digitized by Google

ungefähr $^1/_{5500}$ des ursprünglichen Volumen, während sie bei 0° nur $^1/_{5585}$, bei 100° aber $^1/_{5460}$ beträgt. Wasser und Alkohol dehnen sich bis zu ihren Siedepunkten, welche bei 100° und 80° liegen, weit stärker aus, als Quecksilber, und hierbei zeigt das Wasser eine höchst wunderbare Eigenschaft von außerordentlicher Wichtigkeit, welche wir jetzt etwas genauer besprechen müssen.

Wenn man Wasser, welches sich dadurch gebildet hat, daß Eis soeben geschmolzen ist, und welches daher die Temperatur von 0° besitzt, allmählich erwärmt, so bemerkt man, daß sich zunächst sein Volumen ein wenig verringert, bis es eine Temperatur von 4° besitzt: erwärmt man es weiter über 4°, dann dehnt es sich erst langsam, dann immer schneller aus bis zu 100°. Während sich das Wasser aber zusammenzog, ist seine Dichtigkeit immer größer geworden und hat ihren größten Werth bei einer Temperatur von 4° erreicht. Bezeichnet man sowohl das Volumen, als auch die Dichtigkeit bei 4° mit 1, so sind für andere Temperaturen nach Despretz folgende Werthe zu setzen:

Temperatur	Volumen	Dichtigkeit
0°	1,0001269	0,999873
1°	1,0000730	0,999927
2°	1,0000331	0,999966
3°	1,0000083	0,999992
4°	1,0000000	0,000000
5°	1,0000082	0,999992
6°	1,0000309	0,000069
7°	1,0000708	0,000029
8°	1,0001216	0,999878
100°	1,0431500	0,958634

Daß das Wasser seine größte Dichtigkeit bei 4° besitzt, läßt sich durch folgenden Versuch beweisen. Durchbohrt man die Wand eines Gefäßes, das in seiner Mitte mit einem Blechrande umgeben ist, in ihrem oberen und ihrem unteren Theile, senkt man durch diese Durchbohrungen Thermometer in das Innere des Gefäßes ein, sodaß durch dieselben zugleich die Bohrlöcher geschlossen werden (Fig. 291), und füllt man das Gefäß mit Wasser von gewöhnlicher Zimmertemperatur, so werden die beiden Thermometer nahezu gleichen Wärmegrad anzeigen. Füllt man nun den äußeren Rand mit Eisstücken, so sieht man, daß zuerst das untere Thermometer anfängt, ziemlich schnell zu sinken, und

Digitized by Google

daß dann erst das obere allmählich nachfolgt: das Wasser, das in der Mitte des Gefäßes durch das beigelegte Eis abgekühlt wird, zieht sich zusammen, wird dichter und sinkt dadurch zu Boden, wo es also zunächst auf das untere Thermometer wirkt. In dieser Weise erfolgt das Sinken der Temperatur im unteren Theile schneller als im oberen, bis das untere Thermometer 4° zeigt: auf diesem Punkte bleibt es ruhig stehen, während das obere Thermometer ihm nicht allein nachfolgt, sondern sogar, wenn es einmal 4° erreicht hat, nun ziemlich schnell noch weiter bis zu 0° herabsinkt. Das Wasser, das unter 4° abgekühlt ist, nimmt also nicht weiter an Dichtigkeit zu: im Gegentheil es wird leichter, indem es sich wieder ausdehnt, schwimmt in Folge dessen oben auf und bewirkt das weitere Sinken des oberen Thermometers. Daß diese Eigenthümlichkeit des Wassers von der größten Tragweite ist, das läßt sich leicht einsehen: durch sie wird bewirkt, daß die Temperatur am Grunde der Seen und tieferen Teichen nie unter 4° sinkt, daß also dort die Fische jederzeit einen Wärmegrad vorfinden, in dem sie bequem noch leben können; und ebenso ist eine Folge derselben, daß die Eisbildung zuerst auf der Oberfläche der Gefäße beginnt. Setzt man einen Krug mit Wasser einer niedrigen Temperatur aus, so bildet sich zunächst eine Decke von Eis, die bald so stark wird, daß das darunter befindliche Wasser, wenn es sich beim Abkühlen weiter ausdehnen will, sie nicht durchstoßen kann und nun den Krug zersprengt.

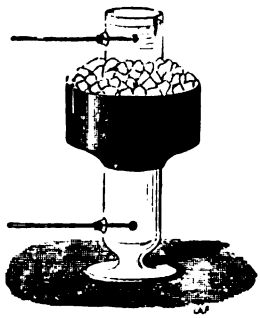


Fig. 291. Beweis, daß das Wasser bei 4° seine größte Dichtigkeit besitzt.

Stärker noch, als die Flüssigkeiten, dehnen sich die Gase aus, sodaß sie geschlossene Gefäße, in denen sie sich befinden, beim Erwärmen leicht und mit starker Explosion zersprengen. Da nun nach dem Mariotte'schen Gesetze das Volumen der Gase auch von dem Drucke abhängig ist, der auf ihnen lastet, so muß man, wenn man ihren Ausdehnungscoëfficienten bestimmen will, die Messungen bei einem constanten Drucke vornehmen oder nach dem Mariotte'schen Gesetze auf einen constanten Drucke reduciren: als solchen Normaldruck aber nimmt man die Quecksilberhöhe von 760^{mm}. Die ersten genaueren Untersuchungen über die Ausdehnung der Gase hat Gay-Lussac gemacht, welcher durch zahlreiche Beobachtungen,

Digitized by Google

die er bei Temperaturen zwischen 0° und 100° anstellte, zu dem bemerkenswerthen Resultate geführt wurde, daß sich alle Gase in gleichem Grade ausdehen, dieselben mögen einfach oder gemischt sein, oder auch aus chemisch verbundenen einfachen Stoffen bestehen. Nach diesem berühmten Physiker wächst ein Gasvolumen um den 267. Theil seiner Größe, wenn sich die Temperatur um einen Grad erhöht, sodaß sich ein Liter Luft um 375 Cubikcentimeter, d. h. um mehr als den dritten Theil ausdehnen würde, wenn es von 0° auf 100° erwärmt wird. Diese Zahl ist ein wenig zu groß, wie sich aus sehr sorgfältigen Untersuchungen Regnault's ergeben hat, aus denen zugleich hervorgeht, daß der Gay-Lussac'sche Satz nicht ganz richtig ist, indem für einige Gase abweichende Ausdehnungscoëfficienten gefunden wurden. Für Luft, Stickstoff, Sauerstoff und Wasserstoff fand Regnault nahezu den gleichen Ausdehnungscoëfficient, nämlich 0,003665 oder $^1/_{273}$ des Volumen für 1°; für andere Luftarten zeigte sich dagegen der Coëfficient etwas größer, so betrug er z. B. für Cyangas 0,00388 oder $^1/_{258}$. Je geringer der Druck ist, dem die verschiedenen Luftarten unterworfen sind, desto mehr stimmt der Grad ihrer Ausdehnung überein, desto genauer ist das Gay-Lussac'sche Gesetz erfüllt.

Einige Folgen davon, daß sich die Luftarten durch Wärme so stark ausdehnen, werden wir in dem Buche besprechen, welches von den Vorgängen in der Atmosphäre handelt: jetzt wollen wir nur noch eine Anwendung erwähnen. Da erhitzte Luft wegen ihrer starken Ausdehnung ein viel geringeres specifisches Gewicht besitzt, als kalte Luft, so werden Ballons aus feinem Zeuge, welche mit heißer Luft gefüllt sind, aufsteigen, ebenso wie Holz im Wasser aufsteigt. Dieser Versuch wurde zuerst durch Montgolfier ausgeführt, und nach ihm nennt man noch jetzt die Luftballons, welche in der angegebenen Weise zum Steigen gebracht werden, Montgolfieren.

§ 4. Aenderung des Aggregatzustandes. — Schmelzen und Erstarren der Körper.

Wir wissen, daß eine Wassermasse, welche bei gewissen Temperaturen flüssig ist, in den festen Zustand übergehen kann, wenn die Temperatur unter eine gewisse Grenze herabsinkt; sie wird zu Eis, ohne daß dabei

Digitized by Google

sich stofflich etwas ändert, d. h. das Eis besitzt noch genau dieselbe Zusammensetzung, es besteht noch aus denselben Elementen, welche noch in genau demselben Verhältnisse mit einander verbunden sind. Steigt die Temperatur zu der vorigen Höhe, so verwandelt sich das Eis wieder zu flüssigem Wasser, und steigert man hierauf die Erwärmung bis auf 100°, so verwandelt es sich in Dampf, welcher als unsichtbare Luftform entweicht. Ebenso wie das Wasser, können auch die meisten anderen Flüssigkeiten alle drei Aggregatsformen annehmen: und auch viele feste Körper, wie die Metalle, werden flüssig, wenn ihnen nur genügende Wärme zugeführt wird; ja die meisten derselben hat man sogar schon in Dampfform verwandelt, wozu freilich ein außerordentlicher Hitzgrad erforderlich ist. Bei der Abkühlung zeigen sich die Vorgänge in umgekehrter Reihenfolge, sodaß luftförmige Körper flüssig und flüssige Körper fest werden.

Die Bedingungen, unter welchen diese Aenderungen vor sich gehen, richten sich nach dem Stoffe, der seine Form verändert, es kommen bei ihnen aber einige allgemein giltige Gesetze zur Geltung, von welchen wir jetzt sprechen wollen. Doch zuvor wollen wir erwähnen, daß man den Uebergang eines festen Körpers in flüssige Form als *Schmelzen*, den Uebergang des flüssigen in Luftform als *Verdampfen*, die umgekehrten Erscheinungen aber als *Erstarren* und *Condensiren der Dämpfe* bezeichnet.

Das Schmelzen verschiedener fester Körper findet bei Temperaturen statt, welche weit von einander entfernt sind: während sich das Eis bei 0° in Wasser verwandelt, schmilzt Schwefel erst bei 110°, Blei bei 322°; um Schmiedeeisen zu schmelzen ist eine Temperatur von 1600°, für Platin aber von fast 2000° erforderlich. Für alle Körper gilt aber das eine gemeinsame Gesetz, daß ihr Schmelzen bei einer ganz bestimmten Temperatur erfolgt, und daß sich diese Temperatur nicht ändert, so lange der Vorgang des Schmelzens andauert, wie viel Wärme auch dem Körper zugeführt werden mag. Erst wenn alle Theile geschmolzen sind, steigt die Temperatur weiter; die einzige Wirkung, welche eine Steigerung der zugeführten Wärme hervorbringt, besteht darin, daß der Schmelzproceß beschleunigt wird. Aus diesem Gesetze geht die Möglichkeit hervor, daß man den Nullpunkt der Thermometer mit großer Schärfe bestimmen kann.

Die meisten Körper gehen plötzlich aus dem festen Zustande in den flüssigen über, wie das Eis, der Schwefel und die meisten Metalle:

Digitized by Google

andere Stoffe dagegen durchlaufen erst einen Zwischenzustand; sie werden klebrig und weich, ehe sie flüssig werden. In diesem Zustande läßt sich z. B. Glas leicht bearbeiten: man kann es dann blasen, in lange Fäden ausziehen und überhaupt in jede beliebige Form bringen. Auch Eisen und Platin gerathen vor dem Schmelzen in einen solchen Zwischenzustand, in welchem sie weicher werden und sich leichter hämmern lassen; auch läßt sich dann bei beiden Metallen ein Verfahren anwenden, welches man Schweißen nennt, und welches darin besteht, daß man durch bloßes Hämmern zwei Stücke mit einander so eng verbindet, als ob sie geschmolzen wären.

Früher war man nicht im Stande, eine so hohe Temperatur zu erzielen, daß eine Anzahl Körper geschmolzen werden konnte: man nannte daher diese Körper feuerbeständig; jetzt ist die Zahl derselben beträchtlich geringer geworden, da man viele Metalle und Steine jetzt schmelzen kann, bei denen dies früher nicht gelang. Manche feste Körper sind deshalb unschmelzbar, weil sie in der Hitze eine Zersetzung erfahren: hierher gehören Kreide, Steinkohlen, Marmor, sowie die meisten organischen Stoffe. Doch ist es durch besondere Vorrichtungen auch gelungen, kleine Stücken Marmor zu schmelzen: man muß dieselben nur in Gefäße mit sehr starken Wänden, welche durchaus keine Luft austreten lassen, einschließen und darin erhitzen. Beim Beginn der Erhitzung wird sich etwas Kohlensäure aus dem Marmor entwickeln, diese wird aber durch ihre Spannkraft so stark auf die übrige Masse drücken, daß ein weiteres Entweichen von Kohlensäure aus dem Steine nicht mehr stattfinden kann, und somit wird der übrige Theil des Marmors doch schließlich schmelzen mit Beibehaltung seines Kohlensäuregehaltes. Nur der reine Kohlenstoff in fester Form, als Diamant so gut, wie als Ruß oder Graphit, hat sich bisher der Schmelzung durchaus widersetzt: ehe aber dies nicht gelingt, darf man eine künstliche Herstellung von Diamanten nicht erwarten.

Kühlt man Flüssigkeiten ab, so kann man bei den meisten derselben schließlich einen Punkt erreichen, wo sie zu festen Körpern werden: sie erstarren und zwar erfolgt dieses Erstarren genau bei derselben Temperatur, bei welcher die festen Körper, in die sie sich verwandeln, wieder schmelzen würden, wenn man ihnen neue Wärme zuführte, statt ihnen Wärme zu entziehen. Das Wasser erstarrt also zu Eis bei 0°, Schwefel bei 110°, und so für alle oben erwähnten Stoffe; und auch, solange

Digitized by Google

das Erstarren dauert, solange ein Theil des Stoffes noch in flüssiger Form vorhanden ist, bleibt der Temperaturgrad derselbe, um erst zu sinken, wenn die ganze Masse in den festen Zustand übergegangen ist: ein Beschleunigen der Abkühlung hat nur zur Folge, daß auch das Erstarren beschleunigt wird, nicht aber ein zeitigeres Sinken der Temperatur. Erfolgt das Erstarren bei einer Temperatur von 0° oder darunter, so nennt man es auch Gefrieren: Wasser gefriert bei 0°, Quecksilber bei — 39°; für manche Flüssigkeiten hat man den Gefrierpunkt noch nicht erreichen können, wie z. B. Schwefelkohlenstoff noch bei — 80° flüssig bleibt.

Kühlt man sehr reines Wasser in einem glatten Gefäße langsam ab und schützt man es dabei vor allen Erschütterungen und jedem Luftzuge, so gelingt es, die Temperatur bis auf — 12° abzukühlen, ohne daß es erstarrt: am leichtesten ist die Erscheinung herbeizuführen, wenn man das Wasser mit einer Oelschicht übergießt und das Gefäß in einem Raume, in dem die Luft stark verdünnt ist, ganz allmählich abkühlen läßt. Wird nun das Wasser bei dieser niedrigen Temperatur nur im mindesten erschüttert, oder wird ein ganz kleiner Eiskrystall in dasselbe geworfen, so gefriert es mit einem Schlage durch die ganze Masse; was aber hierbei das merkwürdigste ist: ein Thermometer, welches in das Wasser taucht steigt plötzlich bis auf 0°, sodaß auch in diesem Falle das Erstarren bei 0° erfolgt.

Wird ein fester Körper geschmolzen, so dehnt er sich in der Regel im Augenblicke des Flüssigwerdens plötzlich aus, und ebenso zieht er sich plötzlich auf einen kleineren Raum zusammen, wenn er erstarrt: allein von dieser allgemeinen Regel machen das Wasser, das Gußeisen, der Wismut und das Antimon eine Ausnahme, indem diese Stoffe im Augenblicke der Erstarrung sich merklich ausdehnen, statt sich zusammenzuziehen. Beim Gußeisen bewirkt diese Eigenthümlichkeit, daß sich dasselbe in alle feineren Theile der Form schärfer hineindrängt, und daß dadurch die Abgüsse an Reinheit und Feinheit sehr gewinnen: für das Wasser ergeben sich aber aus ihr einige merkwürdige Beobachtungen.

Wir haben schon ausführlich besprochen, daß sich das Wasser ausdehnt, wenn es von 4° auf 0° abgekühlt wird, und wollen jetzt hinzufügen, daß man den Grund für diese Erscheinung darin zu finden glaubt, daß die Molecüle schon eine bestimmte Gruppirung annahmen, durch welche sich das Krystallisiren vorbereitet, und daß diese Gruppirung mehr

Digitized by Google

Platz für sich in Anspruch nimmt, als die Molecüle brauchen würden, wenn sie ohne solche Ordnung neben einander lägen. Je mehr nun die Krystallisirung um sich greift, desto mehr steigert sich auch dieses Sichausdehnen und erreicht seinen höchsten Grad, wenn die ganze Masse krystallisirt ist, sodaß also während des Erstarrens eine Vergrößerung des Volumen eintritt, die so heftig ist, daß sie außerordentlich starke Wirkungen hervorbringt. So füllte Tyndall verhältnißmäßig kleine eiserne Flaschen, deren Wandstärke $1\frac{1}{2}$ Centimeter betrug, mit Wasser und schloß sie durch eiserne Pfropfen, welche auf ihrem Hals aufgeschraubt wurden. Setzte er dieselben nun einer starken Kälte aus, so mußte sich natürlich das Wasser zusammenziehen, bis es bei 4° seine größte Dichtigkeit erreichte, sodaß es die Flaschen nicht mehr vollständig füllte: von da an

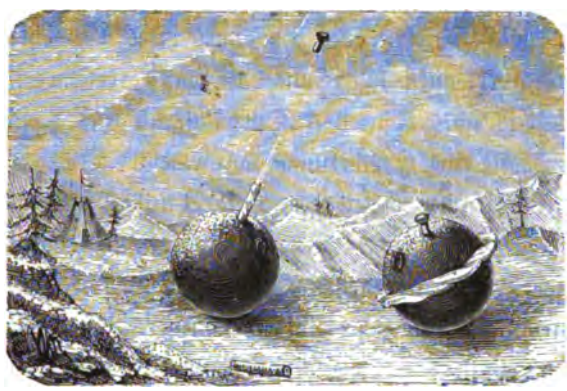


Fig. 292. Kraft, mit welcher sich das Wasser beim Erstarren ausdehnt.

aber dehnt es sich wieder aus, füllt die Flaschen, und in dem Augenblicke, wo es erstarrt, sucht es mit solcher Heftigkeit ein größeres Volumen zu gewinnen, daß die Flaschen regelmäßig zersprengt wurden. Ein anderes, merkwürdiges Experiment führte der Major der Artillerie Edward William zu Quebeck aus. Derselbe füllte Bomben mit Wasser, trieb in die Oeffnungen starke eiserne Pfropfen ein und setzte sie der Kälte aus: als das Wasser nun in Erstarrung überging, trieb es den einen Pfropfen mit solcher Heftigkeit aus der Oeffnung, daß er 150 m weit wegflog, und zugleich drang ein langer Eiscylinder aus der Oeffnung: die andere Bombe aber wurde quer durch gesprengt, und aus dem Spalte drang eine dicke Wulst von Eis (Fig. 292). Aus dieser plötzlichen Ausdehnung des Wassers erklärt es sich, daß so häufig im Winter die Röhren der

Digitized by Google

Wasserleitungen bersten, ein Uebel, das sich gewöhnlich erst beim Aufthauen bemerklich macht, weil bis dahin das Wasser nicht auslaufen kann, indem die Spalten durch Eis geschlossen sind. Ebenso, wie durch Eis lassen sich eiserne Gefäße auch dadurch sprengen, daß man sie mit geschmolzenem Wismut füllt und gut schließt.

§ 5. Verdampfung und Condensation der Dämpfe.

Die meisten Körper gehen zuvor in den flüssigen Zustand über, ehe sie sich in die Dampfform verwandeln; doch giebt es auch einige, bei denen sofort an Stelle des festen Aggregatzustandes der luftförmige tritt, wie Kampher, Jod, Arsenik u. a. m., und auch diejenigen Körper, welche in der Regel erst geschmolzen werden, sondern in ihrem festen Zustande Dämpfe aus, wie sich aus der Abnahme ihres Gewichtes und ihres Volumen deutlich erkennen läßt: auch bei ganz trockener, starker Kälte nehmen Stücke Eis und Schneeflocken merklich ab und verschwinden vollständig, ohne daß eine Schmelzung vorausgeht. Ist ein Körper aber einmal flüssig, so sendet er bei jeder Temperatur beständig Dämpfe aus, ohne daß hierzu irgend eine weitere Veranlassung vorhanden zu sein scheint: Wasser in einem offenen Gefäße schwindet allmählich; feuchte Gegenstände trocknen, und zwar um so schneller, je wärmer die Luft ist und je weniger Wasserdampf sie bereits enthält: noch mehr aber wird dieses Trocknen beschleunigt, wenn sich die Luft dabei in Bewegung befindet. Auch Quecksilber sendet beständig Dämpfe aus, wie aus folgendem Versuche, den Faraday angiebt, hervorgeht: hängt man ein Goldblättchen in eine Flasche, die Quecksilber enthält, so ist die Oberfläche desselben nach einiger Zeit ganz weiß geworden; das Gold hat sich mit Quecksilber zu Amalgam verbunden, was nur möglich ist, wenn von dem flüssigen Metalle Dämpfe aufsteigen, da es in keiner anderen Weise zum Golde gelangen kann.

Diese Art der Dampfbildung, welche sich dadurch kennzeichnet, daß sie bei jeder beliebigen Temperatur erfolgt, aber sich nur über die oberflächlichen Schichten der Flüssigkeit erstreckt, heißt *Verdunstung*: von ihr unterscheidet sich die *eigentliche Verdampfung*, welche erst bei einer Temperatur eintritt, deren Höhe einerseits von der Natur der Flüssigkeit, andererseits aber auch von der Größe des Luftdruckes abhängt,

Digitized by Google

und welche sich während des ganzen Vorganges unveränderlich auf gleicher Höhe erhält. Diese Verdampfung erstreckt sich durch die ganze Masse der Flüssigkeit, sodaß an allen Punkten in derselben sich Dampfblasen bilden, die vermöge ihrer Leichtigkeit aufsteigen und die ganze Flüssigkeit in heftige Wallungen versetzen; man sagt in diesem Falle, daß der Stoff siedet: die eigentliche Verdampfung erfolgt also beim Sieden der Flüssigkeiten.

Die Siedetemperatur ist, wie erwähnt, für jede Flüssigkeit bei einem bestimmten Luftdruck von ganz bestimmter Größe: höchstens kann sie durch die Beschaffenheit des Gefäßes, in dem das Sieden erfolgt, etwas modificirt werden. So hat z. B. Gay-Lussac bei Wasser, das in einem Glasgefäße unter einem Drucke von 760^{mm} sott, eine Siedetemperatur von 101° beobachtet, was wohl darin seinen Grund haben mochte, daß das Wasser stärker am Glase anhaftet, als an Metallen, und daß dadurch der Eintritt des Siedens verzögert wird. Während des Siedens selbst bleibt die Temperatur constant; auch in diesem Falle hat ein stärkeres Zuführen von Wärme nur den Erfolg, daß der Vorgang beschleunigt, nicht daß die Temperatur gesteigert wird. Die nachbenannten Flüssigkeiten sieden unter einem Drucke von 760^{mm} bei den beistehenden Temperaturen, welche man ihre Siedepunkte nennt:

Salzäther	11°
Alkohol	80
Wasser	100
Schwefelsäure	325
Quecksilber	350
Schwefel	400.

Fig. 293. Sieden des Wassers in offenen Gefäßen.

In welcher Weise das Sieden erfolgt, das sieht man am besten am Wasser, das in einer Glasflasche enthalten ist und von unten her erwärmt wird (Fig. 293). Da sich die Wärme zunächst dem Boden und den Wänden des Gefäßes mittheilt, so werden wir sehen, daß sich zuerst am Boden und bald darauf an den Wänden Dampfblasen bilden, welche anfangen, sich in der Flüssigkeit zu erheben, aber, wenn die Masse derselben groß genug ist, im oberen Theile sich so stark abkühlen, daß der Dampf wieder in

Digitized by Google

die flüssige Form übergeht: zugleich drängt sich das benachbarte Wasser in den Raum, der vorher von der Dampfblase eingenommen wurde, und verursacht ein Geräusch, das sich bei seiner häufigen und regelmäßigen Wiederholung zu einem gleichmäßigen Tone umwandelt: das Wasser singt. Bald werden die aufsteigenden und sich im oberen Theile verdichtenden Blasen genügende Wärme auch dorthin gebracht haben, sodaß den nachfolgenden Blasen nicht von Neuem Wärme entzogen wird und sie nun bis an die Oberfläche aufsteigen können, wo sie platzen. Hierdurch entsteht eine wallende Bewegung, welche immer lebhafter wird, je mehr sich die Temperatur dem Siedepunkte nähert: ist dieser Punkt erreicht, so hat sich die Bewegung der ganzen Masse mitgetheilt, welche nunmehr siedet. Verfolgt man den Weg der Blasen, so sieht man, daß dieselben Kegel beschreiben, die oben in eine Spitze auslaufen, solange das Wasser noch singt: ist das Sieden aber eingetreten, so dehnen sich die Blasen aus, je höher sie hinaufsteigen, weil dann der Druck der Flüssigkeit, der auf ihnen lastet, um so geringer wird.

Fig. 294. Papin'scher Topf.

Während der Dauer des Siedens in offenen Gefäßen bleibt die Spannung des Wasserdampfes genau gleich dem Drucke der äußeren Luft, wie man an der Stellung des Manometers erkennt, das an dem Siedeapparate angebracht war, den Fig. 279 darstellt: und da nun andererseits diese Spannung mit der Temperatur wächst, wie wir bald sehen werden, so folgt, daß die Siedetemperatur um so niedriger ist, je geringer, und um so höher, je größer der Luftdruck ist. Während bei einem Drucke von 760 mm der Siedepunkt des Wassers bei 100° liegt, fand Sauffure auf dem Mont Blanc, daß das Wasser bei 86° kochte, als der Luftdruck 434 mm betrug: ebenso bestimmten Bravais und Martins auf den Grands-Mulets am Abhange desselben Berges die Siedetemperatur bei 529 mm Druck zu 90°, auf dem Gipfel des Mont Blanc aber bei 424 mm zu 84,4°.

Digitized by Google

Kann man dagegen den Druck beliebig ſteigern, ſo läßt ſich auch der Siedepunkt ſo hoch legen, als man nur immer will: dieſes Steigern des Druckes wird aber am einfachſten dadurch bewirkt, daß man den Waſſerdampf nicht entweichen läßt, ſodaß er auf den Spiegel der Flüſſigkeit immer ſtärker drücken muß, je mehr man die Temperatur erhöht. Man erhitzt daher das Waſſer in vollſtändig geſchloſſenen Gefäßen, wie z. B. im Papin'ſchen Topfe (Fig. 294), einem cylindriſchen Gefäße aus Eiſen, deſſen Wände ſehr feſt und dick ſind, und deſſen ſtarker Deckel durch eine Schraube gegen die Ränder der Oeffnung gepreßt wird. Damit nun der Dampf einen gewiſſen hohen Grad von Spannung nicht überſteigen und dadurch das Gefäß ſprengen kann, iſt im Deckel eine Oeffnung angebracht, die durch einen eiſernen Pfropfen geſchloſſen iſt: dieſer Pfropfen wird durch einen Hebel niedergehalten, an deſſen längerem Arme ſich ein Gewicht befindet, durch welches man das Maximum der Spannung im Voraus beſtimmen kann. Beträgt z. B. das angehängte Gewicht 1 Kgr. und iſt es in einem Punkte befeſtigt, der vom Drehpunkte fünfmal ſo weit abſteht, als der Pfropfen, ſo wird letzterer durch eine Kraft von 5 Kgr. feſtgedrückt: nehmen wir nun an, daß er eine Oberfläche von 1 qcm beſitzt, ſo laſtet jener Druck gleich dem Drucke von 5 Atmoſphären, wozu nun noch der Druck der äußeren Luft oder 1 Atmoſphäre kommt. Bei dieſem Gewichte kann alſo die Spannung des Waſſerdampfes 6 Atmoſphären nicht überſteigen: denn iſt ſie größer, ſo hebt ſie den Pfropfen, es entweicht Dampf, ſodaß die Spannung nun ſo gering wird, daß das Gewicht den Pfropfen wieder feſtdrückt. In dieſem Topfe kann man alſo das Waſſer bei einer Temperatur ſieden laſſen, die weit höher liegt, als 100°, in welcher z. B. Zinn, Wismut, Blei ſchmilzt: in ihm laſſen ſich Stoffe kochen, die im offenen Topfe ſich nicht verändern, wie Sehnen, Knochen, Haut.

Fig. 295. Sieden des Waſſers bei einer Temperatur unter 100°.

Digitized by Google

Je niedriger der Luftdruck ist, desto niedriger ist auch die Siedetemperatur: stellt man daher unter die Luftpumpe ein Glas mit Wasser, so kann man durch Verdünnen der Luft das Wasser bei der gewöhnlichen Zimmerwärme zum Sieden bringen. Läßt man mit dem Auspumpen der Luft nach, sobald das Sieden begonnen hat, so wird sich der innere Raum des Recipienten bald mit Dämpfen erfüllen, welche nun auf die Flüssigkeit drücken, sodaß das Sieden wieder aufhört: kühlt man nun den Recipienten dadurch ab, daß man feuchte Tücher gegen ihn drückt, so wird sich ein Theil der Dämpfe condensiren, ihr Druck läßt nach und das Sieden im Glase beginnt von Neuem. Auch ohne Luftpumpe läßt sich dieser Versuch in folgender Weise ausführen: man läßt in einem Kochfläschchen Wasser eine Zeit lang sieden, sodaß durch die Dämpfe alle Luft ausgetrieben ist, verkorkt dann die Flasche, kehrt sie um und taucht sie mit ihrem Halse unter Wasser (Fig. 295), so beginnt das Sieden in ihr sofort wieder, wenn man kaltes Wasser von oben gegen sie spritzt, weil sich dadurch Dämpfe im oberen Raum niederschlagen und mithin der Druck, der auf ihr lastet, geringer wird. Es entsteht also hier der Schein, als ob durch Abkühlung das Sieden hervorgerufen würde.

Fig. 296. Verdunstung einer Flüssigkeit im leeren Raume eines Barometers. Erstes Dalton'sches Gesetz.

Um die Bedingungen verstehen zu können, unter welchen der umgekehrte Vorgang, die Verdichtung der luftförmigen Körper zu Flüssigkeiten, stattfindet, ist es nothwendig, daß wir erst die Gesetze erwähnen, welche für die Bildung der Dämpfe im luftleeren Raume gelten, und welche der Physiker Dalton aufgefunden hat. Bringt man in den leeren Raum einer Barometerröhre über das Quecksilber eine andere Flüssigkeit, etwa ein Cubikcentimeter Alkohol, so sieht man, daß sofort der Quecksilberspiegel

Digitized by Google

in dem Rohre eine niedrigere Stellung einnimmt, daß er z. B. von a bis b ſinkt (Fig. 296): es beſteht alſo in dieſem Rohre ein Gegendruck, der dem äußeren Luftdrucke entgegenwirkt, ſodaß die Queckſilberſäule, welche von letzterem noch getragen wird, niedriger iſt, als die Queckſilberſäule in einem Barometer, in dem ſich kein Alkohol befindet, und welches wir als trocknes Barometer bezeichnen wollen, während wir das andere, das Alkohol enthält, das naſſe Barometer nennen. Dieſer Gegendruck aber kann nur daher rühren, daß von dem Alkohole Dämpfe aufgeſtiegen ſind, deren Spannung den Druck bewirken, deſſen Größe durch den Unterſchied des Niveau des Queckſilbers im trocknen und im naſſen Barometer gemeſſen wird. Das erſte Dalton'ſche Geſetz heißt daher: *im luftleeren Raume ſteigen von jeder Flüſſigkeit Dämpfe auf, welche eine gewiſſe Spannung beſitzen und dadurch nach allen Seiten einen Druck ausüben.*

Fig. 297. Der Druck des Dampfes einer Flüſſigkeit bleibt bei gleicher Temperatur unveränderlich. Zweites Dalton'ſches Geſetz.

Zieht man nun die Röhre des naſſen Barometers weiter aus dem Gefäße, in das ſie taucht, in die Höhe, während ſich ihr unteres Ende noch unter dem Niveau des äußeren Queckſilbers befindet, ſo behält doch immer die Queckſilberſäule in der Röhre dieſelbe Höhe, ſolange ſich nur über dem Queckſilber noch eine dünne Schicht der Flüſſigkeit befindet. Dabei iſt aber die Flüſſigkeitsſchicht über dem Queckſilber dünner geworden, woraus man ſchließt, daß ſich eine neue Menge der Flüſſigkeit in Dampf verwandelt hat, und daß andererſeits die Spannung der Dämpfe ſich nicht geändert hat (Fig. 297). Fährt man ſo fort, bis auch die letzte Spur der Flüſſigkeit verſchwunden iſt, und hebt man nun das Barometerrohr noch weiter, ſo ſieht man, daß ſich nun das Niveau der

Digitized by Google

Queckſilberſäule zu heben beginnt, daß mithin der Unterſchied im Stande des naſſen und trocknen Barometers nicht mehr ſo groß iſt, und daß alſo die Spannung der Dämpfe nunmehr abnimmt. Senkt man nun wieder die Röhre, ſo erſcheint in dem Augenblicke, wo die Queckſilberſäule wieder bis auf die vorige Höhe herabgeſunken iſt, über ihr eine Flüſſigkeitsſchicht, welche an Dicke zunimmt, je weiter man das Rohr eintaucht: die Höhe der Queckſilberſäule bleibt aber auch jetzt wieder unveränderlich. Hieraus ergiebt ſich das zweite Geſetz: *die Spannung der Dämpfe beſitzt ihren größten, für eine beſtimmte Temperatur unveränderlichen Werth, ſolange ſich in dem Raume Flüſſigkeit befindet, die noch nicht die Dampfform angenommen hat.* Man ſagt in dieſem Falle, daß der Raum mit Dämpfen geſättigt iſt.

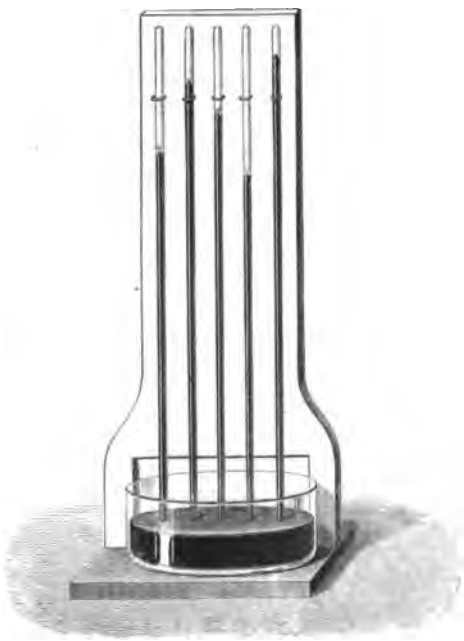


Fig. 298. Ungleichheit der Spannung verſchiedener Dämpfe bei gleicher Temperatur.

Stellt man den Verſuch mit verſchiedenen Flüſſigkeiten, z. B. mit Waſſer, Alkohol, Aether u. ſ. w. an, ſo zeigt ſich, daß die Dämpfe derſelben bei gleicher Temperatur nicht dieſelbe Spannung beſitzen, wie aus der Verſchiedenheit der Höhe der Queckſilberſäulen bei dem in Fig. 298 dargeſtellten Verſuche hervorgeht.

Aendert man nun bei dieſen Verſuchen die Temperatur, ſo zeigt ſich ſofort, daß ſich auch die Spannung der Waſſerdämpfe ändert, und zwar nimmt dieſelbe ab, wenn die Temperatur ſinkt, beim Steigen der Temperatur aber wächſt die Spannung allmählich immer ſtärker. Selbſt unter den Nullpunkt darf man die Temperatur erniedrigen, und auch da zeigt der Waſſerdampf noch eine gewiſſe, wenn auch geringe, Spannung: erhöht man dagegen die Temperatur bis über den Siedepunkt der betreffenden Flüſſigkeit, ſo iſt die beſchriebene Methode nicht mehr anwendbar,

Digitized by Google

ſondern man muß dann das Erwärmen in geſchloſſenen Gefäßen vornehmen und den Druck durch Manometer meſſen. Wir wollen hier eine Ueberſicht der Spannung des Waſſerdampfes bei verſchiedenen Temperaturen folgen laſſen, in der die niedrigeren Spannungen in Millimetern, die höheren in Atmoſphären ausgedrückt ſind:

Temperatur	Spannung	Temperatur	Spannung
— 10°	2,1 mm	+ 120°	2 Atmoſphären
0	4,6	+ 134	3 „
+ 10	9,2	+ 144	4 „
+ 20	17,4	+ 152	5 „
+ 30	31,6	+ 180	10 „
+ 40	55,0	+ 212	20 „
+ 50	92,0	+ 236	30 „
+ 100	760,0	+ 266	50 „

Aus dieſer Ueberſicht ſieht man, daß die Spannung des Waſſerdampfes bei den höchſten Temperaturen, die wir in unſerem Klima beobachten, dem Drucke einer Queckſilberſäule von etwa 32 mm Höhe gleichkommt: hieraus würde alſo folgen, daß, wenn auf dem Dampfe ein höherer Druck laſtete, derſelbe ſich verdichten müßte. Nun ſehen wir aber alltäglich, daß ſich das Waſſer bei gewöhnlicher Temperatur in Dampf verwandelt, trotzdem daß ein viel höherer Druck, nämlich ein Druck von ungefähr 760 mm beſtändig auf ihm laſtet: wie alſo ſoll man ſich dieſe Erſcheinung erklären? Verſuchen wir hierauf eine Antwort zu geben, indem wir an analoge Erſcheinungen erinnern. Bringt man in ein Gefäß zwei Flüſſigkeiten, die ſich nicht miſchen, Waſſer und Queckſilber, ſo wird ſich die ſchwerere am Boden ablagern, die leichtere auf ihr ſchwimmen, und das Waſſer wird keine Queckſilbertheile, das Queckſilber keine Waſſertheile in ſich aufnehmen: läßt man dagegen in einen Raum zwei Luftarten einſtrömen, ſo durchdringen ſich dieſelben, ohne eine eigentliche Verbindung mit einander einzugehen, ſo vollſtändig, daß ſich jede nach einiger Zeit durch den ganzen Raum ausgebreitet hat. Beſteht doch unſere atmoſphäriſche Luft aus einem Gemiſche von Sauerſtoffgas und Stickſtoffgas, und zwar hat man ſelbſt auf den größten Höhen, die man erreicht hat, eine Aenderung des Miſchungsverhältniſſes nicht wahrgenommen, trotzdem daß der Sauerſtoff ſchwerer iſt als der Stickſtoff. So wie dieſe Gaſe breitet ſich aber auch der Waſſerdampf zwiſchen der Luft aus, ohne von ihr gehindert zu werden, und Gay-Luſſac

Digitized by Google

hat experimentell nachgewiesen, daß die Spannung des Dampfes, wenn bei einer gewissen Temperatur Sättigung eingetreten ist, ganz dieselbe ist, mag sich der Dampf in einem im Uebrigen luftleeren Raume befinden, oder mag neben ihm noch Luft oder irgend ein anderes Gas vorhanden sein.

Je höher die Temperatur ist, desto mehr Dampf ist erforderlich, bis die Luft mit demselben gesättigt ist: daher kommt es sehr häufig vor, daß die Atmosphäre bei heißen Sommertagen, die uns vollständig trocken scheinen, in Wirklichkeit mehr Dampf erhält, als bei nebligen, feuchten Wintertagen. Diese Thatsache kann nur dann auffallen, wenn man den Wasserdampf mit den Nebeln und Wolken verwechselt: der Wasserdampf ist ein im hohen Grade durchsichtiger und dadurch vollkommen unsichtbarer Stoff; die Wolken dagegen bestehen aus flüssigem Wasser, das sich in Form von feinen Bläschen oder Tropfen niedergeschlagen hat: sie haben sich aus dem Dampfe gebildet, indem sich derselbe durch Temperaturerniedrigung verdichtete. Nicht alle Dämpfe sind farblos und vollkommen durchsichtig: sondern Joddampf z. B. erscheint purpurviolet, Chlordampf gelblichgrün, und Bromdampf rothbraun.

Will man einen Dampf oder ein Gas in die flüssige Form überführen, so hat man dazu zwei Mittel: entweder muß man es zusammendrücken oder man muß es abkühlen. In beiden Fällen behält es durchaus die luftförmige Beschaffenheit, bis der Raum, in dem es sich befindet, vollständig gesättigt ist, und erst wenn dieser Punkt überschritten ist, wenn man es also nun noch weiter zusammenpreßt oder abkühlt, schlägt es sich in Form von Tropfen an den Wänden der Gefäße nieder. Bei den Luftarten, die erst durch das Verdunsten von Flüssigkeiten entstanden sind, und die man gewöhnlich ausschließlich mit dem Namen der *Dämpfe* bezeichnet, hat das gar keine Schwierigkeiten: es genügt eben nur, daß man wieder dieselben Bedingungen der Temperatur und des Druckes herbeiführt, welche stattfanden, ehe die Verwandlung in Dampf vor sich ging. Doch auch eine Anzahl anderer Luftarten, die man gewöhnlich als *Gase* bezeichnet, hat man schon condensirt, und so ist es z. B. gelungen, Ammoniak, Chlor, Kohlensäure, Stickoxydulgas in flüssiger Form darzustellen, ja man hat sogar dieselben Körper, mit Ausnahme des Chlor auch in feste Form gebracht, indem man sehr starken Druck und große Kälte auf sie wirken ließ. Der Condensation widersetzt haben sich

Digitized by Google

bisher nur Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff, Kohlenoxydgas und Stickoxydgas, trotzdem daß man sie bis 110° unter Null abkühlte und gleichzeitig einem Drucke bis zu 50 Atmosphären unterwarf: man nennt daher diese Körper permanente Gase, ist aber doch der Ansicht, daß es möglich ist, auch diese Stoffe in flüssige Form zu bringen, wenn man nur erst noch kräftigere Mittel anwenden kann.

Zweites Kapitel.

Ausbreitung der Wärme.

§ 1. Strahlende Wärme.

Als wir die Wirkungen beschrieben, welche die Wärme in den verschiedenen Körpern hervorbringt, indem sie dieselben ausdehnt und ihren Aggregatzustand ändert, da haben wir noch nicht berücksichtigt, in welcher Weise sich die Wärme verbreitet, wie sie von der Wärmequelle zu den Körpern gelangt. Wenn sich zwei Körper im Raume neben einander befinden, welche sich entweder berühren, oder auch durch einen Zwischenraum von einander getrennt sind, so findet immer, wie durch Versuche nachgewiesen werden kann, zwischen ihnen ein Austausch der Wärme statt, in der Weise, daß jeder für den anderen eine Quelle der Wärme ist: nicht nur der wärmere sendet dem kälteren Wärme, sondern auch vom kälteren geht beständig Wärme zu dem wärmeren über, nur ist dieselbe geringer, als die, welche er von jenem empfängt, weshalb man gewöhnlich nur die erstere berücksichtigt.

Dieser Uebergang der Wärme von einem Körper znm anderen kann nun auf zweierlei verschiedene Arten erfolgen, wie wir an einigen Beispielen leicht zeigen können: hält man das eine Ende einer kalten Eisenstange in der Hand und taucht man das andere Ende derselben in Feuer, so vergeht einige Zeit, bis sich die Wärme, welche sich nach und nach über die Stange verbreitet, für unsere Hand bemerklich macht: je kürzer die Stange ist, desto eher empfinden wir auch die Wärme; behalten wir nun die Stange in der Hand, so fühlen wir weiter, daß die Wärme immer mehr zunimmt, bis sie so stark ist, daß wir sie nicht mehr ertragen können. In diesem Falle hat die Wärme die Eisenstange der

Digitized by Google

ganzen Länge nach von Molecül zu Molecül durchwandert: durch Vermittelung der Materie ist sie von einem Ende zum anderen weiter befördert worden und schließlich aus den Theilen, mit welchen unsere Hand in unmittelbarer Berührung war, auf dieselbe übergegangen. Wir nennen diese Art der Fortpflanzung der Wärme die Leitung: ihr wesentliches Kennzeichen besteht darin, daß bei ihr die Wärme zum Zurücklegen eines Weges eine merkliche Zeit gebraucht, in der sie sich von Punkt zu Punkt weiter überträgt.

Steht dagegen vor einem heftigen Feuer oder vor einer glühenden Metallmasse ein Schirm, welcher uns vor dem heißen Körper deckt, und wird dieser Schirm plötzlich entfernt, so empfinden wir in demselben Augenblicke die Gluth, wenn wir uns auch in ziemlicher Entfernung von der Wärmequelle befinden: die Wärme kann daher nicht dadurch zu uns gelangt sein, daß sie sich von Theilchen zu Theilchen übertrug, sondern sie muß eine ähnliche Bewegung, wie das Licht, ausgeführt haben, mit anderen Worten, sie muß sich in Form von Strahlen ausgebreitet haben, und diese Fortpflanzung durch Strahlung muß mit außerordentlicher Geschwindigkeit erfolgen. Andere Arten der Ausbreitung der Wärme lassen sich auf die eine oder andere dieser beiden Arten zurückführen oder als Combinationen beider ansehen; daher werden wir uns nur mit diesen beiden Arten beschäftigen und mit der strahlenden Wärme beginnen.

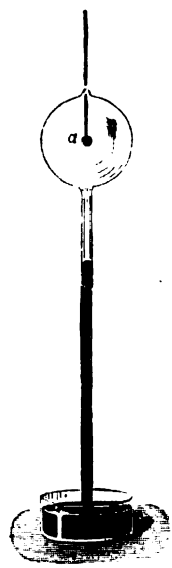


Fig. 299. Strahlung der dunklen Wärme im luftleeren Raume.

Sobald sich des Morgens die Sonne über dem Horizonte erhebt, so fühlen wir die Strahlen der Wärme, welche uns von diesem Himmelskörper zugesendet werden, und kurze Zeit darauf ist auch der Erdboden, welcher den Strahlen ausgesetzt ist, merklich erwärmt. Also die Wärme, welche von jenem 20000000 Meilen weit entfernten Körper ausgeht, gelangt durch den leeren Raum zwischen Sonne und Erde in kürzester Zeit zu uns: sie bedarf mithin zu ihrer Ausbreitung keines Stoffes, ja die Stoffe, durch welche sie hindurchgeht, die oberen Luftschichten unserer Atmosphäre, werden nicht einmal durch sie in ihrer Temperatur erhöht.

In gleicher Weise, wie die Sonne, senden auch alle glühenden irdischen

Digitized by Google

Körper Strahlen nach allen Seiten, ja dasselbe gilt auch für dunkle Körper, deren Temperatur höher ist, als die der Umgebung: auch von ihnen gehen Strahlen aus, die keines Stoffes als Träger bedürfen, und durch welche entferntere Körper erwärmt werden, ohne daß die Temperatur der zwischenliegenden sich merklich steigert. Um dies nachzuweisen verfertigte Rumford ein Barometerrohr, das an seinem oberen Ende eine Kugel trug, in welche ein Thermometer a hineinreichte (Fig. 299). Wurde nun das Barometerrohr gefüllt und wie beim Torricelli'schen Versuche umgekehrt, so befand sich das Thermometer in einem luftleeren Raume. Rumford schmolz nun den unteren Theil der Röhre mit dem Löthrohre zu, indem er dabei sorgte, daß keine Luft in den Ballon dringen konnte, und entfernte darauf den luftleeren Ballon von dem Stumpf der Röhre. Sobald er hierauf den Ballon mit seiner unteren Seite in siedendes Wasser tauchte, so sah er, daß das Thermometer zu steigen anfing: also auch von dem Wasser, das durchaus keine Lichtstrahlen aussendete, gingen Wärmestrahlen aus, welche den luftleeren Raum durchwanderten und auf die Kugel des Thermometers trafen, das durch sie zum Steigen gebracht wurde.

§ 2. Reflexion der Wärmestrahlen.

Zwischen den Erscheinungen der strahlenden Wärme und denen des Lichtes herrscht eine vollständige Uebereinstimmung: beide folgen denselben Gesetzen, sodaß man zu der Annahme gekommen ist, daß die Lichtstrahlen und die Wärmestrahlen wohl Bewegungen derselben Art ihre Entstehung verdanken, wie man schon aus der Existenz der Wärmestrahlen, die im Sonnenspectrum jenseits der rothen Strahlen liegen, schließen konnte.

Wie das Licht pflanzt sich auch die strahlende Wärme in gerader Linie fort: bringt man zwischen eine Wärmequelle und die eine Kugel eines Leslie'schen Differentialthermometers eine Reihe von Schirmen, deren jeder mit einem Loche durchbohrt ist, so zeigt dasselbe eine Steigerung der Temperatur nur dann an, wenn alle die Löcher mit der Kugel und der Wärmequelle in einer geraden Linie liegen. Man sieht hieraus zugleich, daß es Körper giebt, welche die Wärmestrahlen nicht durchlassen, sogenannte athermane Körper, während anderen, die diathermanen, ihnen den Durchgang mehr oder weniger leicht gestatten: zu letzteren

LIBRARY OF THE UNIVERSITY OF ILLINOIS
Digitized by Google

gehören viele durchsichtige Körper, besonders Luft und andere Gase, aber auch eine ziemliche Anzahl dunkler Körper sind diatherman. Die Geschwindigkeit, mit der sich die Wärme ausbreitet, ist wahrscheinlich ebenso groß, als die Geschwindigkeit des Lichtes, wenigstens haben Versuche, die man eigens zu diesem Zwecke anstellte, einen Zeitunterschied für die Ausbreitung der Wärmestrahlen und der leuchtenden Strahlen des Spectrum nicht ergeben.

Trifft ein Wärmestrahl auf eine spiegelnde Fläche, so wird er nach ganz denselben Gesetzen zurückgeworfen, wie die Lichtstrahlen. Stellt man zwei paraboliſche Spiegel einander so gegenüber, daß ihre Axen zusammen-

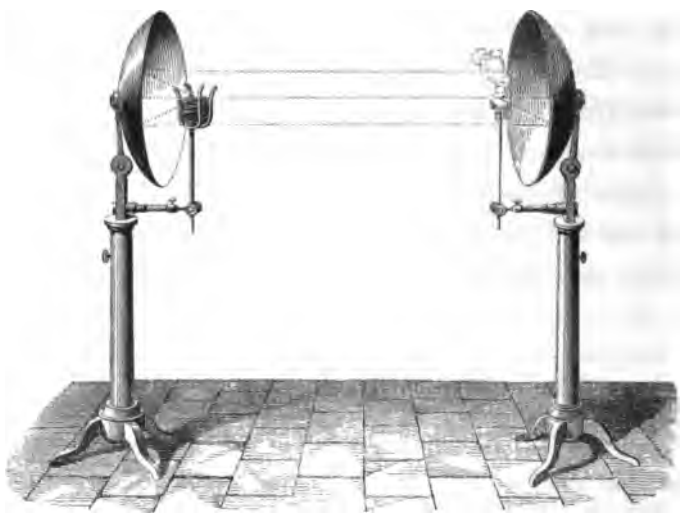


Fig. 300. Reflexion der Wärme durch zwei paraboliſche Spiegel.

fallen (Fig. 300) und bringt man in den Brennpunkt des einen ein Körbchen aus Eisendraht, das mit glühenden Kohlen gefüllt ist, in den des anderen etwas Feuerschwamm, Pulver, Schießbaumwolle, oder einen anderen leicht entzündlichen Stoff, so geräth derselbe sofort in Flammen. Verschiebt man dagegen entweder die Wärmequelle oder den entzündlichen Stoff nur ein wenig aus der richtigen Stellung, so gelingt der Versuch nicht: ein Beweis, daß die Reflexion der Wärmestrahlen in aller Strenge nach den Reflexionsgesetzen erfolgt. Im luftleeren Raume erfolgt die Reflexion der Wärmestrahlen genau nach denselben Gesetzen, wie Davy nachgewiesen hat, und auch dunkle Wärmestrahlen werden in derselben Weise zurückgeworfen, wie leuchtende: denn stellt man in den Brennpunkt

Digitized by Google

des einen Spiegels ein Gefäß mit siedendem Wasser, so steigt sofort ein Thermometer, dessen Kugel sich im Brennpunkt des anderen Spiegels befindet, zeigt aber keine Temperaturerhöhung an, wenn es von diesem Punkte aus etwas zur Seite gerückt ist.

An dieser Stelle wollen wir einen merkwürdigen Versuch erwähnen, aus dem hervorzugehen scheint, daß es auch Kältestrahlen gebe: bringt man nämlich in den einen Brennpunkt ein Stück Eis an Stelle des siedenden Wassers, so sinkt sofort das Thermometer, gerade als ob das Eis Kältestrahlen aussendete. In Wirklichkeit ist der Sachverhalt aber der, daß von jedem der Körper Wärmestrahlen ausgehen, die sich in dem anderen Körper vereinigen: jeder Körper giebt also Wärme ab und empfängt vom anderen Wärme, und je nachdem nun Verlust oder Gewinn größer ist, wird seine Temperatur sinken oder steigen. Beim ersten Versuche erhielt das Thermometer vom siedenden Wasser mehr Wärme, als es an dasselbe abgab, folglich stieg es; beim anderen dagegen gab es an das Eis mehr Wärme ab, als es von ihm zurückerhält, folglich fiel es.

Fig. 301. Brennspiegel.

Concentrirt man die Sonnenstrahlen in dem Brennpunkte eines Hohlspiegels, der dann Brennspiegel genannt wird (Fig. 301), so kann man sehr hohe Hitzgrade erzielen, durch welche Metalle geschmolzen, Ziegel gebrannt, Steine verglast werden: im Jahre 1694 wurde zu Florenz im Brennpunkte eines Hohlspiegels, den Tschirnhausen verfertigt hatte, ein Diamant verbrannt. Um zu untersuchen, wie viel wohl an der Erzählung wahr sein möge, daß Archimedes die römische Flotte durch Hohlspiegel verbrannt habe, stellte Buffon 100 belegte Glasspiegel so auf, daß sie alle die Sonnenstrahlen auf einen Punkt warfen: durch diese Vorrichtung gelang es ihm, Blei in einer Entfernung von 140′, Silber in einer Entfernung von 100′ zu schmelzen.

Digitized by Google

§ 3. Brechung der Wärmestrahlen.

Ebenso wie die Lichtstrahlen, werden auch die Wärmestrahlen, die auf die Oberfläche eines Körpers treffen, theils regelmäßig reflectirt, theils auch nach allen Seiten hin zerstreut, sodaß sie also in beiden Fällen in das Mittel zurückkehren, aus welchem sie zu der Fläche des Körpers gelangen: ein letzter Theil endlich dringt in den Körper ein. Doch auch diese Strahlen, die in den Körper eindringen, zerfallen in zwei Abtheilungen: manche erreichen im Körper ihr Ende und dienen dazu, seine Temperatur zu erhöhen, andere dagegen gehen durch ihn hindurch, wie

Fig. 302. Brechung der Wärmestrahlen.

die Lichtstrahlen durch einen durchsichtigen Körper. Welcher Bruchtheil der Strahlen von einem Körper regelmäßig reflectirt, welcher zerstreut, welcher absorbirt und welcher hindurchgelassen wird, das hängt von der Natur des Körpers und der Beschaffenheit seiner Oberfläche ab, und wir werden später auf einige dieser Beziehungen wieder zu sprechen kommen: für jetzt wollen wir uns nur mit den Erscheinungen beschäftigen, die sich zeigen, wenn die Wärme durch diathermane Körper hindurchgelassen wird.

Wir haben schon bei der Besprechung des Sonnenspectrum erwähnt, daß dasselbe außer den farbigen Strahlen auch noch chemische und Wärmestrahlen aufweist, und daß die letzteren der Hauptsache nach noch jenseits des rothen Lichtes fallen: wir sehen also hieraus, daß auch die Wärmestrahlen beim Uebergange aus einem Mittel in ein anderes eine Brechung

Digitized by Google

nach ganz denselben Gesetzen, wie die Lichtstrahlen, erleiden, nur daß der Brechungsexponent einen geringeren Werth besitzt, als selbst für das rothe Licht. Läßt man daher die Strahlen der Sonne durch eine Sammellinse hindurchgehen, so werden sich nicht blos die Lichtstrahlen, sondern ebensogut auch die Wärmestrahlen in einem Punkte, dem Brennpunkte vereinigen, und es ist sehr leicht, mit einer Loupe, die man deshalb auch Brennglas nennt, Schwamm, Papier oder Holz zu entzünden (Fig. 302). Sind doch sogar Feuersbrünste durch die Brechung der Wärmestrahlen durch Wasserflaschen entstanden. Ein Brennglas wirkt um so kräftiger, je größer seine Oberfläche und je flacher seine Krümmung ist: so hat z. B. Tschirnhausen, den wir schon bei Gelegenheit der Brennspiegel erwähnten, Linsen von beinahe einem Meter Durchmesser angefertigt, mit denen er Metalle schmelzen und Porzellan brennen konnte. Noch geeigneter sind hierzu die Fresnel'schen Treppenlinsen (Fig. 303), welche Buffon zu diesem Zwecke anwendete. Diese Linsen sind auf der einen Seite plan, auf der anderen aber befindet sich in der Mitte ein ziemlich flaches Kugelsegment, welches von concentrischen Ringen umgeben ist, deren Flächen ebenfalls Theile von Kugeloberflächen sind. Die Krümmungen dieser Ringe sind so berechnet, daß jeder Theil die Strahlen genau auf denselben Punkt bricht, viel genauer, als dies bei einer gewöhnlichen Linse von gleicher Oeffnung und gleicher Brennweite der Fall sein kann. Außerdem hat diese Linse noch den Vorzug, daß sie viel dünner ist, als eine gewöhnliche, und deshalb viel weniger Wärme absorbirt. Daß auch die Strahlen von dunkler Wärme in einem Punkte vereinigt werden, hat Melloni mit Hülfe von Linsen aus Steinsalz, welches die Wärme fast gar nicht absorbirt, nachgewiesen.

Fig. 303. Fresnel'sche Treppenlinse.

Digitized by Google

Auch aus Flüssigkeiten hat man Brenngläser verfertigt, indem man zwei gebogene Glasplatten so aneinander befestigte, daß zwischen ihnen ein linsenförmiger Hohlraum frei blieb, den man mit der Flüssigkeit füllte. So haben im vorigen Jahrhundert Bernières und Trudaine Linsen von 4′ Durchmesser und 8′ Krümmungsradius verfertigt, die sie mit Terpentinöl füllten und mit welchen sie außerordentliche Hitzgrade erzielten. Endlich hat man auch Linsen aus Eis verfertigt, durch welche sich Pulver, Papier, und andere Stoffe entzünden lassen, und wohl schon manchmal haben sich die Nordpolfahrer solcher Linsen bedient, um ihr Feuer zu entzünden.

Aus allem, was wir bisher erwähnt haben, zeigt sich deutlich die größte Uebereinstimmung zwischen den Strahlen des Lichtes und denen der Wärme: beide pflanzen sich in einem und demselben Mittel in geraden Linien fort, mit einer Geschwindigkeit, welche für beide nicht wesentlich verschieden ist, beide werden nach denselben Gesetzen reflectirt und gebrochen. Fügen wir nun weiter noch hinzu, daß sehr sorgfältige Beobachtungen gezeigt haben, daß auch die Wärmestrahlen eine doppelte Brechung erleiden, und daß sie durch dieselbe, wie auch durch einfache Brechung und durch Reflexion polarisirt werden, so ergiebt sich unzweifelhaft, daß zwischen den Lichtstrahlen und den Wärmestrahlen eine Verschiedenheit nicht besteht, daß beide durch dieselben Ursachen entstehen, d. h. daß sie in Schwingungen des Aethers ihren Grund haben. Erst in unseren Sinneswerkzeugen scheint die Trennung vor sich zu gehen, indem manche Schwingungen nur auf unser Gefühl wirken und uns die Empfindung der Wärme verursachen, andere nur von der Netzhaut als Licht empfunden werden, noch andere aber beide Empfindungen zugleich hervorrufen. Nur in der Länge der Wellen und der Oscillationsgeschwindigkeit besteht insofern ein Unterschied, daß der Wärme die größte Wellenlänge und damit die geringste Brechbarkeit zukommt. Diese Ansichten, welche so verschiedenartige Erscheinungen auf einen gemeinsamen Ursprung zurückführen, gewinnen in der Wissenschaft immer mehr Anerkennung, und die alten Hypothesen, nach denen Wärme, Licht, Elektricität und Magnetismus durchaus von einander verschiedene selbständige Kräfte seien, sind jetzt fast vollständig aufgegeben. Zur Unterstützung der Ansicht, daß die Wärme eine Bewegungsform ist, werden wir bald noch andere Beweise anführen, indem wir zeigen, daß sich Wärme in Bewegung und

Digitized by Google

Bewegung in Wärme verwandelt: eine Erscheinung, für die es durchaus keine Erklärung geben könnte, wenn man die alte Ansicht beibehalten wollte, nach welcher die Wärme ein besonderer Stoff ist.

§ 4. Ausstrahlung und Reflexion der Wärme.

Alle Körper senden bei jeder Temperatur Wärme aus, wie wir durch Versuche, die den oben beschriebenen ähnlich sind, nachweisen können, und es macht hierbei keinen Unterschied, ob mit den Wärmestrahlen zugleich auch Lichtstrahlen verbunden sind, oder ob es sich um sogenannte dunkle Wärme handelt. Befinden sich daher irgend zwei Körper einander gegenüber, so strahlt jeder nach dem anderen hin Wärme aus, welche zum Theil an der Oberfläche des anderen reflectirt oder zerstreut wird, zum Theil ihn durchdringt: ein letzter Theil endlich wird von dem Körper absorbirt, und dieser ist es allein, welcher seine Temperaturerhöhung bewirkt, indem er ganz allmählich von Molecül zu Molecül geleitet wird.

Sind die beiden Körper, welche einander gegenüberstehen, in einem Raume so eingeschlossen, daß keine Wärme aus demselben entweichen kann, und ist zugleich ihre Temperatur verschieden, so läßt sich leicht zeigen, daß sich der wärmere allmählich abkühlt, der kältere dagegen erwärmt, bis endlich beide gleiche Temperatur erlangt haben: sobald dieser Fall eingetreten ist, darf man nicht etwa annehmen, daß nun der Austausch an Wärme ein Ende erreicht hat, sondern er erfolgt nur so, daß jeder Körper immer wieder ebensoviel Wärme in sich aufnimmt, als er durch Strahlung verliert. Man schließt hieraus, daß für jeden Körper die absorbirende Kraft und das Strahlungsvermögen einander gleich sind, und hat diesen Satz durch Versuche, bei denen man Temperaturen bis zu 300° anwendete, bestätigt gefunden.

Die Geschwindigkeit, mit welcher die Wärme ausgestrahlt wird, mit welcher also der erwärmte Körper sich abkühlt, hängt zunächst von der Höhe seiner Temperatur ab, im Vergleiche mit der Temperatur der Körper, welche ihn umgeben: je höher im Verhältniß seine Temperatur ist, desto stärker strahlt er Wärme aus, wobei es im Uebrigen gleichgiltig ist, ob er sich in einem luftleeren Raume befindet, oder ob er von Luft oder einem anderen Gase umschlossen ist. Weiter ist aber die Stärke der Ausstrahlung auch in hohem Grade abhängig von der Beschaffenheit

Digitized by Google

der Oberfläche, durch welche sie erfolgt, wie es sich durch einen Versuch, den Leslie angegeben hat, leicht zeigen läßt. Als Wärmequelle nimmt man einen hohlen Würfel, dessen Seitenflächen durch die Stoffe gebildet sind, deren Strahlungsvermögen man untersuchen will, füllt ihn mit Wasser und erhält dasselbe durch eine Spirituslampe beständig im Sieden. Diesem Würfel A (Fig. 304) gegenüber stellt man einen Hohlspiegel M auf, in dessen Brennpunkte a sich die eine Kugel eines Differentialthermometers befindet. Um die Wärmestrahlen auf einen bestimmten Raum einzuschränken, stellt man noch zwischen Würfel und Spiegel zwei Schirme B und C auf, in denen sich Oeffnungen von der Größe einer Würfelseite befinden. Dreht man nun nach einander die verschiedenen

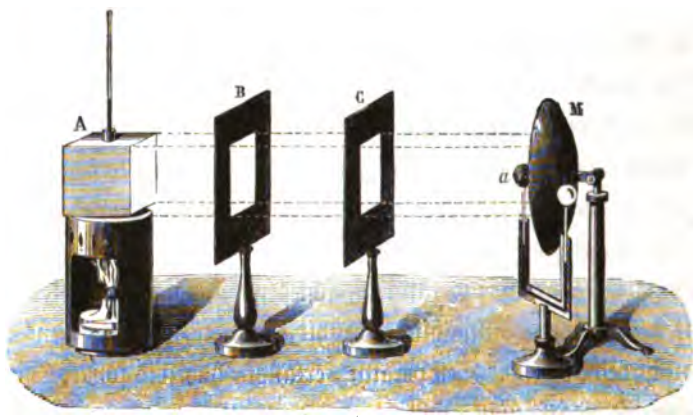


Fig. 304. Strahlungsvermögen der Körper. Versuch mit Leslie's Würfel.

Seiten des Würfels nach dem Spiegel hin, so zeigt das Differentialthermometer verschiedene Grade von Erwärmung an; damit ist bewiesen, daß die verschiedenen Oberflächen die Wärme nicht in gleichem Grade ausstrahlen, während doch die Temperatur der Wärmequelle im Innern dieselbe geblieben ist.

Auch nach Leslie hat man das Strahlungsvermögen vieler Körper durch ähnliche Apparate gemessen, und hat übereinstimmend gefunden, daß dasselbe beim Ofenruß und Bleiweiß am größten ist. Bezeichnet man dasselbe mit 100, so findet man bei einer Temperatur von 100° für nachgenannte Stoffe folgende Werthe:

Ofenruß	100	Glas	90
Bleiweiß	100	Chinesische Tusche	85
Papier	98	Gummilack	72

Digitized by Google

Stahl	17	Kupfer	7
Platin	17	Polirtes Gold	3
Polirtes Messing	7	„ Silber	3

Man sieht, daß die Metalle das geringste Strahlungsvermögen besitzen. Früher glaubte man, daß helle Körper die Wärme weniger gut ausstrahlen als dunkle: die vorstehende Uebersicht widerspricht aber dieser Meinung, da das Strahlungsvermögen des Bleiweiß, das man für einen der hellsten Körper ansehen kann, ebenso groß ist, als das des Ofenrußes. Dagegen wirkt die Glätte der Oberfläche, wie z. B. die Politur der Metalle, sehr auf dieses Vermögen ein: ritzt man polirte Platten, so erhöht man dasselbe bei gewalzten oder geschlagenen Metallen, vermindert es dagegen bei gegossenen Metallen, woraus sich eine merkwürdige Abhängigkeit des Strahlungsvermögens von der Dichtigkeit der Oberflächen zu ergeben scheint. Aus den gefundenen Resultaten läßt sich leicht die Thatsache erklären, daß sich Flüssigkeiten in Metallgefäßen, besonders in silbernen, lange Zeit heiß erhalten, wenn die Oberfläche gut polirt ist: ist dagegen die Oberfläche matt oder gar mit Ruß bedeckt, so wird die Strahlung viel heftiger und die Flüssigkeit kühlt schnell in dem Gefäße ab.

Vom Strahlungsvermögen wollen wir uns jetzt zu der zurückwerfenden Kraft der Oberflächen wenden. Wenden wir athermane Körper an, d. h. also, wie wir früher erwähnten, solche Körper, welche die Wärme nicht durch sich hindurch gehen lassen, so wird von den Wärmestrahlen, welche auf ihre Oberfläche treffen ein gewisser Theil zurückgeworfen, der andere Theil aber absorbirt, die Summe beider muß aber ebenso viel betragen, als die ganze Wärme, welche zum Körper gelangt ist. Die absorbirende und die reflectirende Kraft ergänzen sich gegenseitig, und da die absorbirende Kraft dem Strahlungsvermögen gleich ist, so gilt dasselbe auch vom Strahlungsvermögen und der reflectirenden Kraft. Kennt man daher das Strahlungsvermögen, so kann man auf die reflectirende Kraft einen Schluß machen: besser jedoch ist es, wenn man diese Kraft selbständig untersucht und dadurch eine Bestätigung des angeführten Satzes erlangt.

Fig. 305. Thermoëlektrische Kette.

Diese Aufgabe hat bereits Leslie mit Benutzung eines Apparates

Digitized by Google

gelöst, der von dem vorher beschriebenen, zur Beobachtung des Strahlungsvermögens construirten, nur wenig abwich: zu viel genaueren Resultaten ist dagegen Melloni gelangt unter Anwendung eines Instrumentes, das wir jetzt in seinen wesentlichsten Theilen beschreiben wollen. Löthet man eine Reihe von Stäbchen A, B, . . . , welche abwechselnd aus Antimon und Wismut bestehen, in der Weise zusammen, wie aus Fig. 305 zu ersehen ist, und verbindet man die äußersten Stäbchen durch einen Metalldraht, so entsteht eine sogenannte thermoëlektrische Kette, und jedes einzelne Paar von Stäbchen heißt ein thermoëlektrisches Element. Bringt man bei einer solchen Kette die ungeraden Löthstellen auf

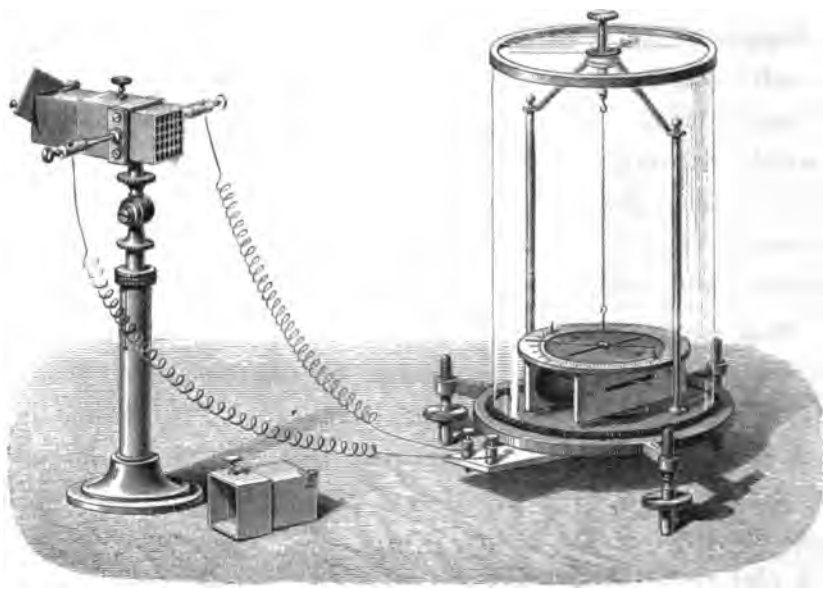


Fig. 306. Thermoëlektrische Säule zur Untersuchung der strahlenden Wärme.

eine andere Temperatur, als die geraden, so bemerkt man durch ein eingeschaltetes Galvanometer, wie wir es im nächsten Buche erwähnen werden, daß durch den Draht in der einen oder anderen Richtung ein elektrischer Strom circulirt, und zwar läuft derselbe an den Löthstellen, deren Temperatur höher ist, vom Wismut zum Antimon. Die Existenz eines solchen Stromes beweist also, daß die Temperatur der einen Reihe von Löthstellen erhöht ist, und durch seine Stärke läßt sich der Unterschied der Temperatur messen. Gewöhnlich giebt man der thermoëlektrischen oder Melloni'schen Säule die Form eines rechteckigen Packets, welches man in eine mit Deckeln versehene Kapsel einschließt; die Enden

Digitized by Google

der Säule setzt man mit einem Galvanometer in Verbindung, auf dessen Beschreibung wir später zurückkommen, öffnet dann den einen Deckel der Kapsel und läßt auf die Löthstellen, die unter ihm liegen, die Wärmestrahlen wirken, deren Intensität man untersuchen will (Fig. 306). Die Empfindlichkeit eines solchen Apparates ist sehr bedeutend, und es genügt schon, daß man die eine Seite der Säule mit dem Finger berührt, oder daß man gegen dieselbe haucht, um einen deutlichen Ausschlag der Magnetnadel im Galvanometer zu erzielen: berührt man dieselbe Stelle hierauf mit einem kalten Körper, so zeigt sich der Ausschlag im entgegengesetzten Sinne.

Um nun die Kraft zu messen, mit der die verschiedenen Oberflächen die Wärme reflectiren, benutzt man eine möglichst constante Wärmequelle,

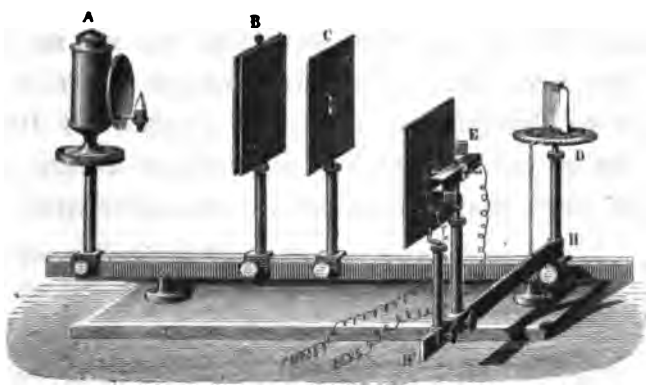


Fig. 307. Melloni's Apparat zur Bestimmung der reflectirenden Kraft der Oberflächen.

wie z. B. eine Argand'sche oder Locatelli'sche Lampe A (Fig. 307), deren Wärmestrahlen entweder durch den Schirm B abgeblendet werden, oder, wenn der Schirm B entfernt ist, durch eine Oeffnung des Schirmes C frei zu der Oberfläche D, deren reflectirende Kraft man bestimmen will, gelangen können. Von dieser Oberfläche werden die Strahlen zu einer Melloni'schen Säule E hingeworfen, welche sich auf einem Lineale HH' verschieben läßt: dieses Lineal ist selbst wieder um den Punkt H drehbar, ebenso wie der Tisch, der die Spiegelfläche D trägt, sodaß man die Stärke der Spiegelung bei jedem Reflexionswinkel messen kann. Zu Anfange der Versuche, bevor man noch den Körper D einschaltet, stellt man das Lineal HH' in die Verlängerung der Leiste ein, welche die Lampe und die Schirme trägt, und läßt die Wärme der Lampe durch

Digitized by Google

die Oeffnung des Schirmes C direct auf die Melloni'sche Säule E wirken, um ein Maß für seine Intensität zu erhalten. Hierauf befestigt man die spiegelnde Fläche auf dem Tische und giebt dem Apparate eine Stellung, wie in Fig. 307: so kann man durch Vergleichung der nunmehrigen Ablenkung der Magnetnadel mit der vorhergehenden bestimmen, wie viele von den auffallenden Wärmestrahlen reflectirt wurden.

De la Provostaye und Desains haben die Melloni'schen Versuche wieder aufgenommen und auf eine sehr große Zahl spiegelnder Flächen ausgedehnt, indem sie zugleich den Reflexionswinkel vielfach abänderten und verschiedene Wärmequellen anwendeten. Aus ihren Versuchen geht hervor, daß die reflectirende Kraft vom rechtwinkligen Auftreffen bis zu einem Einfallswinkel von ungefähr 30° nahezu constant bleibt, daß sie aber von da an mit dem Einfallswinkel sehr schnell zunimmt. Für die Metalle ändert sich die reflectirende Kraft nicht, wie auch ihre Oberfläche bearbeitet sein mag, wenn sie nur eine genügende Glätte besitzt. Bezeichnet man die Intensität der auffallenden Strahlen mit 100, so ergeben sich für die Intensität der von nachbenannten Stoffen reflectirten Strahlen bei einem Einfallswinkel von 50° folgende Werthe:

	Reflectirende Kraft	Strahlungsvermögen
Polirtes Silber	97	3
Gold	95	3
Kupfer	93	7
Polirtes Messing	93	7
Platin	83	17
Stahl	83	17
Glas	10	90
Ruß	0	100

Vergleicht man die Werthe der reflectirenden Kraft mit den beigeschriebenen Werthen des Strahlungsvermögens, so sieht man, in wie auffälliger Weise der Satz, den wir oben anführten, sich bestätigt, daß bei athermanen Körpern die Summe der absorbirten und der reflectirten Strahlen gleich dem ganzen auffallenden Lichte sein muß, wenigstens, solange man von der Wärme absehen darf, die von der Oberfläche unregelmäßig zerstreut, in diffuse Wärme verwandelt wird. Polirte Metalle reflectiren das Licht am besten: ist dagegen ihre Oberfläche matt oder gestreift, so werden die Wärmestrahlen nach allen Seiten hin zurückgeworfen und die Menge der regelmäßig reflectirten Wärme nimmt be-

Digitized by Google

trächtlich ab, während die diffuse Wärme in demselben Maße zunimmt; es zeigen sich also Erscheinungen, die den Erscheinungen beim Lichte ganz analog sind.

Auch das Absorptionsvermögen ist von Leslie und Melloni mit den von ihnen erfundenen Apparaten direct untersucht worden, und es hat sich in der That gezeigt, daß die Größe desselben in der Regel mit dem Strahlungsvermögen übereinstimmt, wie wir schon aus den Erscheinungen beim Ausgleiche der Wärme zwischen zwei Körpern im Voraus vermuthet hatten. Welchen Einfluß die Farbe auf die Größe der Absorption besitzt, das hat schon Franklin durch einen sehr einfachen Versuch nachgewiesen: dieser berühmte Physiker legte nämlich mehrere Tuchfleckchen von verschiedener Farbe auf Schnee, der von der Sonne beschienen wurde, und beobachtete, in welchem Grade der Schnee unter ihnen dadurch hinweggeschmolzen war, daß sie die Sonnenwärme absorbirten und dem Schnee mittheilten. Da nun im Allgemeinen die Fleckchen in den Schnee um so tiefer einsanken, je dunkler ihre Farbe war, so glaubte man, daß man aus diesen Resultaten schließen dürfe, daß die Wärme von den hellen Farben in nur geringem Grade, von den dunkeln sehr stark absorbirt werde, worin wieder eine neue Analogie zwischen Licht und Wärme sich offenbarte: allein Tyndall hat gezeigt, daß dies nicht in aller Strenge richtig ist, daß sich besonders die dunkle Wärme in dieser Beziehung anders verhält, als die mit Lichtstrahlen vermischte; und endlich ist auch die Stärke, mit der das Licht durch die Stoffe hindurchgelassen wird, auf das Absorptionsvermögen von großem Einflusse. Als der genannte Gelehrte eine Karte mit weißem Alaunpulver, eine zweite mit schwarzem Jodpulver bestreut hatte und dieselbe dem Feuer gegenüberstellte, nahm er nach einiger Zeit wahr, daß die erste Karte sehr heiß geworden war, während sich die mit Jodpulver bestreute kaum etwas erwärmt hatte; Tyndall vermuthet, daß der Grund für diese Erscheinung wohl darin zu suchen ist, daß das Jod ein in hohem Grade diathermaner Körper ist, durch welchen die Wärme hindurchgeht, an dessen Molecülen sie reflectirt wird, ohne daß der Körper selbst sich erhitzt. Ebenso entzündete sich ein fast schwarzes Stück amorphen Phosphors nicht im electrischen Kohlenlichte, während Platin in demselben sofort zum Glühen gebracht wurde, was wohl auch darin seinen Grund hat, daß die Wärmestrahlen durch den Phosphor im vollkommenen Grade hindurchgelassen werden.

Digitized by Google

§ 5. Transmission der Wärme.

Dringen Wärmestrahlen in einen Körper ein, so werden sie entweder von ihm absorbirt oder frei hindurchgelassen, und zwar verhalten sich die verschiedenen Körper in dieser Beziehung sehr verschieden: bei manchen ist das Absorptionsvermögen, bei anderen das Transmissionsvermögen oder die Fähigkeit, die Wärmestrahlen hindurchzulassen, stärker ausgebildet. In letzterer Beziehung ist unter allen festen Körpern das Steinsalz am meisten ausgezeichnet: von 1000 Wärmestrahlen, welche auf dasselbe treffen, gehen nicht weniger als 923 durch dasselbe, die übrigen 77 werden aber nicht etwa absorbirt, sondern an der Oberfläche reflectirt, sodaß sich das Steinsalz nicht merklich erwärmt, soviel Wärmestrahlen auch durch dasselbe hindurch gehen. Zu diesem merkwürdigen Resultate

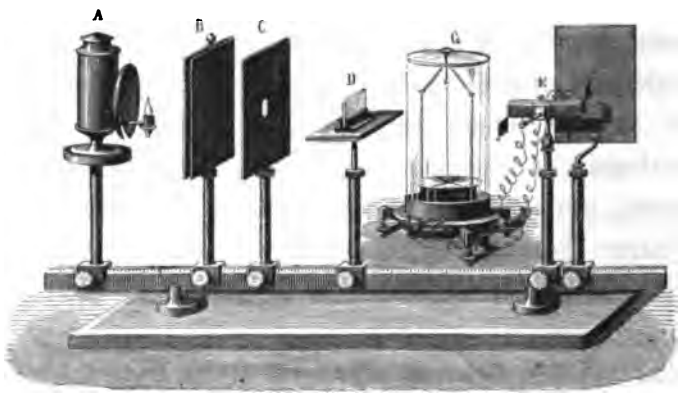


Fig. 308. Melloni's Apparat zur Bestimmung des Transmissionsvermögens der Körper.

ist Melloni durch sorgfältige Versuche gelangt, durch welche er auch nachgewiesen hat, daß sich die Erscheinung nicht ändert, mag man leuchtende oder dunkle Wärmestrahlen anwenden. Alaun und Glas dagegen sind nur für die leuchtenden Wärmestrahlen diatherman, während sie die dunklen absorbiren; und ebenso verhalten sich Doppelspath, Bergkrystall und Eis. Mit der Dicke der Platten nimmt das Transmissionsvermögen etwas ab, jedoch nicht etwa im einfachen Verhältnisse: läßt z. B. eine diathermane Platte 62 % der Wärme durch, so läßt eine Platte von doppelter Dicke vielleicht 58 %, von vierfacher Dicke 55 % austreten.

Auch für die Messung des Transmissionsvermögens hat Melloni einen Apparat construirt, der in Fig. 308 abgebildet ist: eine Lampe A

Digitized by Google

und zwei Schirme B und C sind ebenso aufgestellt, wie im vorher besprochenen Apparate; das Tischchen D aber ist so eingerichtet, daß sich auf ihm die Platten aus den Stoffen aufstellen lassen, deren Transmissionsvermögen man bestimmen will. Hinter demselben befindet sich die Melloni'sche Säule E in der Richtung, in welcher sich die Wärmestrahlen von der Lampe durch die Oeffnung des Schirmes C weiter verbreiten. Bestimmt man nun einmal die Ablenkung des Galvanometers G, wenn die Strahlen der Wärmequelle direct auf die Melloni'sche Säule fallen, das andere Mal, wenn sie zuvor durch eine Platte hindurchgehen, so giebt das Verhältniß beider Ablenkungen das Transmissionsvermögen der Platte an. Um den Einfluß der Beschaffenheit der verschiedenen Wärmequellen kennen zu lernen, wendet Melloni folgende Arten von Lampen an: zuerst eine Locatelli'sche Lampe, d. h. eine Spirituslampe, bei welcher die Temperatur dadurch constant erhalten

Fig. 309. Würfel mit siedendem Wasser.

Fig. 310. Geschwärzte Kupferplatte.

Fig. 311. Glühende Platinspirale.

wird, daß sich das Niveau des Weingeistes immer in gleicher Höhe erhält, zweitens den Würfel mit siedendem Wasser (Fig. 309), drittens eine geschwärzte Kupferplatte, welche durch eine Weingeistflamme auf der Temperatur von 400° erhalten wurde (Fig. 310), und endlich eine Weingeistlampe, in deren Flamme eine Platinspirale taucht, die beständig weißglühend bleibt (Fig 311). Um die Resultate mit einander vergleichen zu können, wurde die Säule für jede einzelne Lichtquelle in einen anderen Abstand gebracht, sodaß jedesmal die directe Strahlung denselben Ausschlagswinkel ergab. Auf diese Weise erhielt Melloni die folgenden

Digitized by Google

Resultate, d. h. er fand, daß durch Platten aus den nachbenannten Stoffen die beigeschriebenen Procente der Wärme, die von einer der Quellen ausstrahlt, hindurchgelassen wurden:

	Locatelli'sche Lampe	Würfel mit siedendem Wasser	Geschwärztes Kupferblech	Glühende Platinspirale
Directe Strahlung . .	100	100	100	100
Steinsalz	92	92	92	92
Doppelspath	39	28	6	0
Glas	39	24	6	0
Bergkrystall	37	28	6	0
Alaun	9	2	0	0
Eis	6	0	0	0

Aus diesen Beobachtungen hat man geschlossen, daß es verschiedene Wärmestrahlen giebt, ebenso wie sich die einzelnen Lichtstrahlen nach den Farben unterscheiden, und daß manche Stoffe leichter die einen, manche leichter die anderen dieser Strahlen hindurchlassen: man bezeichnet diese Eigenthümlichkeit der Wärme als Färbung der Wärmestrahlen oder als Thermochroismus.

Auch die Intensität der strahlenden Wärme nimmt, ebenso wie die des Lichtes und des Schalles, mit dem Quadrate der Entfernung ab: ein Satz, den man leicht durch folgenden, von Tyndall angegebenen, Versuch beweisen kann. Man versieht die eine Seite einer Melloni'schen Säule mit einem kegelförmigen Trichter, der nur den Wärmestrahlen innerhalb eines bestimmten Raumes den Zutritt gestattet, und der im Innern geschwärzt ist, um zu verhindern, daß seine Oberfläche Wärmestrahlen reflectirt. Als Quelle für die strahlende Wärme nimmt man ein Gefäß aus Blech, dessen eine Seite mit Ruß bedeckt ist, und in dem Wasser siedend erhalten wird (Fig. 312). Dieser geschwärzten Seite stellt man die Melloni'sche Säule in einer bestimmten Entfernung SO gegenüber und beobachtet den Ausschlagswinkel des Gal-

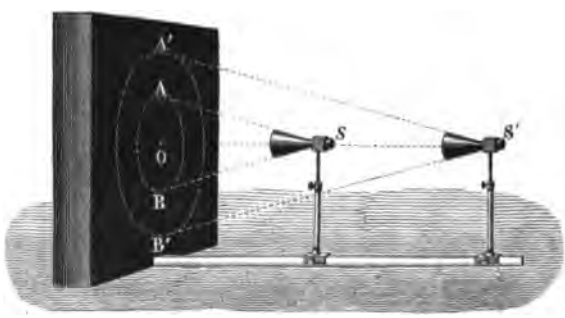


Fig. 312. Abnahme der strahlenden Wärme mit dem Quadrate der Entfernung.

Digitized by Google

vanometers: rückt man hierauf die Säule in die doppelte Entfernung S', so ändert sich der Ausschlag des Galvanometers nicht, wie auch bei jeder anderen Entfernung. Die Erklärung hierfür ist einfach folgende: befindet sich die Säule in doppelter Entfernung, so erhält sie die Wärme von einem Kreise, dessen Durchmesser A'B' doppelt so groß ist, als der Durchmesser AB des Kreises, welcher ihr bei der einfachen Entfernung seine Wärme zusendet. Bei doppeltem Durchmesser ist aber die Fläche viermal so groß: und da die Wirkung auf die Säule ganz dieselbe geblieben ist, so folgt, daß jeder einzelne Strahl in der doppelten Entfernung nur den vierten Theil so stark wirkt. Mit einem Worte, es ist hierdurch die Abnahme der Intensität mit dem Quadrate der Entfernung bewiesen.

§ 6. Ausbreitung der Wärme durch Leitung.

Wir haben bereits erwähnt, daß, wenn man eine Eisenstange mit dem einen Ende in das Feuer hält, die Wärme sich in dem Metalle der ganzen Länge nach von Molecül zu Molecül in kurzer Zeit so verbreitet, daß man das andere Ende nicht anfassen kann, ohne sich zu verbrennen. Hätte man an Stelle der eisernen Stange irgend ein anderes Metall angewendet, dem man genau dieselbe Größe und Gestalt giebt, so würde man einen ganz ähnlichen Erfolg beobachten, nur wird die Zeit, die vergeht, bis die Wärme am anderen Ende wieder dieselbe Höhe erreicht hat, eine größere oder geringere sein, je nach dem Metalle, welches man bei dem Versuche benutzt hat. Die Wärme breitet sich also in den Metallen von Punkt zu Punkt allmählich weiter aus; diese Ausbreitung erfolgt aber in den verschiedenen Metallen mit ungleicher Geschwindigkeit, wie sich durch folgenden einfachen Versuch leicht zeigen läßt. Man nimmt zwei Stangen, von genau gleichen Dimensionen, die eine aus Kupfer, die andere aus Eisen, und klebt an ihren unteren Seiten Holzkugeln in gleichen Abständen durch Wachs fest, hängt dann die Stangen so auf, daß ihre Enden an einanderstoßen, und erwärmt die Stelle, wo sie sich berühren, über einer Spiritusflamme. Dadurch, daß sich die Wärme in den Stangen weiter verbreitet, schmilzt das Wachs, und eine Holzkugel nach der anderen fällt herab; allein, wenn man nach einiger Zeit zusieht, so sind auf der Seite der Kupferstange mehr Kugeln

Digitized by Google

abgefallen, als auf der Seite der Eisenstange: beobachtet man zwei Kugeln, die von der erwärmten Stelle gleichen Abstand haben, so sieht man, daß die Kugel von der Kupferstange zeitiger abfällt, als die von der Eisenstange. Sind die Stangen ziemlich lang, so werden die letzten Kugeln gar nicht abfallen, weil sich die Wärme nicht in solchem Grade, wie er zum Schmelzen des Wachses erforderlich ist, bis an's Ende hin

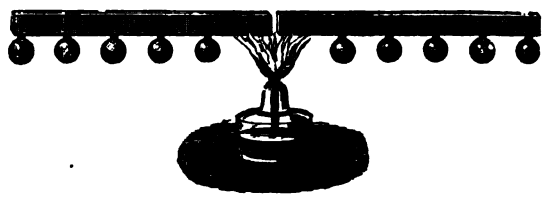


Fig. 313. Ungleiches Leitungsvermögen des Kupfers und des Eisen.

verbreitet: immerhin aber werden am Kupfer die Kugeln in größerem Abstande noch abfallen, als am Eisen. Wir schließen hieraus, daß sich die Wärme im Kupfer nicht blos schneller, sondern auch auf größere Entfernungen hin verbreitet, als im Eisen, und nennen deshalb das Kupfer einen besseren Leiter der Wärme, als das Eisen.

Um die Verschiedenheit des Leitungsvermögens der Metalle anschaulich zu machen, hat Ingenhouß den folgenden, später von Gay-Lussac verbesserten Apparat ersonnen: in einem Kasten sind Stäbe aus den verschiedenen Stoffen, deren Leitungsfähigkeit man prüfen will, von gleicher Länge und gleicher Stärke horizontal so befestigt, daß das eine Ende in das Innere des Kastens hineinreicht. Jeder dieser Stäbe ist seiner Länge nach mit einer gleichmäßigen Schicht von Wachs überzogen, der Kasten aber wird mit Wasser oder Oel gefüllt, welches im Sieden erhalten wird. Die Wärme verbreitet sich in jedem Stabe um so weiter, je größer die Leitungsfähigkeit desselben ist, was man dadurch erkennt, daß das Wachs bis auf eine gewisse Entfernung hin geschmolzen wird. In ähnlicher Weise hat man das Leitungsvermögen vieler fester Körper bestimmt und für dasselbe z. B. für die nachbenannten Körper die beigeschriebenen Verhältnißzahlen gefunden:

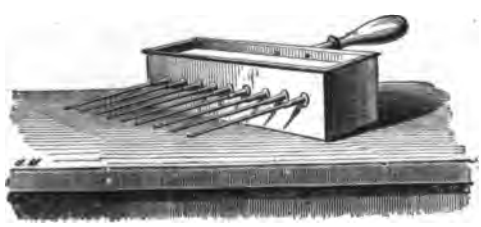


Fig. 314. Apparat nach Ingenhouß zur Messung des Leitungsvermögens der Metalle.

Digitized by Google

Silber	1000	Eisen	119
Kupfer	736	Stahl	116
Gold	532	Blei	85
Messing	236	Platin	84
Zink	190	Palladium	63
Zinn	145	Wismut	18

Unter allen festen Körpern sind die Metalle, mit Ausnahme des Wismut, die besten Leiter der Wärme: Steine, Glas, Marmor leiten dieselbe in geringerem Maße; und hierauf folgt endlich das Holz, Holzkohle, welche bei niedriger Temperatur bereitet ist, und überhaupt organische Substanzen, fleischige Früchte, fettige Gewebe der Thiere und Pflanzen. Man sieht aus der obigen Uebersicht, welche Verschiedenheit in der Leitungsfähigkeit schon zwischen den einzelnen Metallen besteht: „Man kann diesen Unterschied," sagt Tyndall, „in sehr einfacher Weise bemerklich machen, wenn man zwei Löffel, von denen der eine aus Neusilber, der andere aus Silber besteht, in ein Gefäß mit heißem Wasser taucht. Nach kurzer Zeit wird man den Stiel des silbernen Löffels viel heißer finden, als den des anderen; legt man etwas Phosphor auf die Löffelstiele, so wird das Stück, das auf dem Silber liegt, nach sehr kurzer Zeit schmelzen und sich entzünden, während die Wärme, die durch den anderen Löffel geleitet wird, niemals eine solche Intensität erlangt, daß sich der Phosphor entzündet." Der Grund hierfür liegt in der ungleichen Leitungsfähigkeit der beiden Metalle, welche für das Silber 1000, für Neusilber nur 60 beträgt.

Das Leitungsvermögen eines Stoffes hängt nicht von der größeren oder geringeren Geschwindigkeit ab, mit der sich die Wärme in ihm ausbreitet: denn stellt man auf den Deckel eines Gefäßes, in welchem Wasser siedet, zwei kurze Cylinder, von denen der eine aus Eisen, der andere aus Wismut besteht, und deren obere Seiten mit Wachs überzogen sind (Fig. 315), so sieht man, daß das Wachs auf beiden Cylindern schmilzt, und zwar beginnt das Schmelzen zuerst auf dem Wismut. Wie soll man sich nun diese Erscheinung erklären, da ja andere Versuche ergeben

Fig. 315. Versuche über die Leitungsfähigkeit des Eisens und Wismut.

Digitized by Google

haben, daß das Leitungsvermögen des Wismut nur den sechsten Theil so groß ist, als das des Eisen? Den Grund darf man nirgends anders suchen, als in einer Eigenthümlichkeit, auf welche wir im nächsten Kapitel zu sprechen kommen, daß nämlich ein bestimmtes Gewicht Eisen eine viermal so große Wärmemenge gebraucht um auf dieselbe Temperatur erhoben zu werden, als ein gleiches Gewicht Wismut. Die Wärme, welche in das Eisen eindringt, wird also zunächst darauf verwendet, seine Temperatur zu erhöhen, und hieraus erklärt sich, daß die Ausbreitung der Wärme verhältnißmäßig langsam erfolgt. Will man das Leitungsvermögen vergleichen, so muß man längere Stangen von gleichem Durchmesser nehmen, muß die Endpunkte desselben auf einer constanten Temperatur erhalten und warten, bis die Erwärmung einen gewissen Gleichgewichtszustand erlangt hat: untersucht man nun in welchem Abstande die Stangen gleiche Temperatur zeigen, so geben die Quadrate dieser Entfernungen das Maß für das Leitungsvermögen.

Bei denjenigen festen Körpern, die nach allen Seiten hin eine gleichmäßige Beschaffenheit besitzen, breitet sich auch die Wärme in allen Richtungen gleichmäßig aus: in den Krystallen dagegen, welche das Licht doppelt brechen, ist auch das Leitungsvermögen, je nach der Richtung der Ausbreitung der Wärme ein verschiedenes, sodaß sich auch hierin eine wunderbare Uebereinstimmung zwischen Licht und Wärme zeigt. Schneidet man aus Quarz zwei Platten, die eine parallel zur Axe, die andere senkrecht zu derselben, durchbohrt man sie weiter mit einer feinen Oeffnung und überdeckt man sie mit einer gleichstarken Schicht Wachs, so wird das Wachs rings um die Oeffnungen zu schmelzen beginnen, sobald man einen Draht, der durch sie gesteckt ist, durch einen elektrischen Strom erwärmt. Aber während der Fleck, in welchem das Wachs schmilzt, auf der Platte, die senkrecht zur Axe geschnitten war, kreisförmig ist, hat er auf der anderen Platte eine elliptische Gestalt (Fig. 316), wodurch bewiesen ist, daß die Ausbreitung der Wärme im Quarz nach der Richtung der großen Axe schneller erfolgt, als in der darauf senkrechten Richtung. In gleicher Weise besitzt auch Holz sein größtes Leitungsvermögen in der Richtung der Fasern.

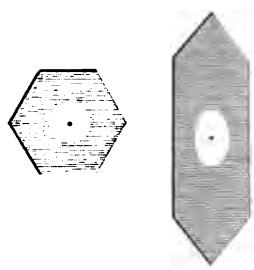


Fig. 316. Ungleiches Leitungsvermögen des Quarzes in den verschiedenen Richtungen.

Digitized by Google

Will man die Leitung der Wärme verhindern, so muß man schlechte Wärmeleiter einschalten: deshalb versieht man die metallenen Werkzeuge, welche einer hohen Temperatur ausgesetzt werden, mit Griffen aus Holz, welches nur außerordentlich wenig geeignet ist, die Wärme weiter zu verbreiten, und schützt dadurch die Hand vor dem Verbrennen. Um in der Kälte die Wärme des eigenen Körpers nicht nach außen hin zu verlieren, umgiebt man den Körper mit schlechten Wärmeleitern, mit Federn, Pelzwerk und wollenen Stoffen. In allen diesen Fällen ist es aber nicht blos die Substanz, aus denen diese Umhüllung besteht, welche die Wärme zurückhält, sondern der geringe Grad von Leitungsfähigkeit hat auch in ihrer Structur seinen Grund, indem sich zwischen ihnen immer eine Menge Hohlräume befinden, die mit Luft erfüllt sind. Da nun die Gase, so lange sie in Ruhe sind, die Wärme sehr schlecht leiten, so schützt die in den Hohlräumen eingeschlossene Luft unsern Körper besser, als jeder andere Stoff: eine dünne Decke, die mit Eiderdunen gefüllt ist, wärmt besser, als wenn die Füllung aus einer viel größeren Menge eines dichten wollenen Stoffes besteht.

In welcher Weise sich die Verschiedenheit des Leitungsvermögens bemerklich macht, dafür jetzt noch einige Beispiele. Ueberzieht man eine Metallkugel mit einem sehr feinen Stoffe, den man fest gegen das Metall preßt, sodaß die Berührung überall möglichst vollkommen ist, und legt man auf diese Kugel eine glühende Kohle, so bleibt das Gewebe doch unverletzt, wenn man auch die Gluth der Kohle durch Blasen immer wieder anfacht, weil alle Wärme, die sie aussendet, von dem Metalle, als einem guten Leiter, aufgesaugt und durch die Masse zerstreut wird.

Bringt man über einem Gasbrenner, ehe man das Gas entzündet, ein Metallnetz mit sehr feinen Maschen an und öffnet man nun den Hahn, so wird sich das Gas sowohl oberhalb als unterhalb des Netzes ausbreiten: entzündet man nun das Gas unterhalb des Netzes, so schlägt die Flamme nicht durch dasselbe hindurch, sondern brennt nur bis an die Maschen heran; wenn man dagegen oberhalb entzündet, so sieht man, daß auch nur der obere Theil der Flamme brennt, während im unteren Theile das Gas unverbrannt bis an das Netz heranströmt (Fig. 317). In beiden Fällen genügt die Anwendung des Metallnetzes, um die Verbrennung auf einen bestimmten Raum zu beschränken: auf

Digitized by Google

der andern Seite des Netzes wird das Gas nicht entzündet, wenn es auf der einen Seite brennt, weil alle Wärme, welche durch die Verbrennung entsteht, von den Drähten des Netzes sogleich aufgesaugt und zerstreut wird, ehe sie die Entzündung des Gases bewirken kann. Diese Eigenschaft der Netze wurde vom englischen Chemiker Davy entdeckt und zur Construction eines sehr nützlichen Instrumentes, der Davy'schen Sicherheitslampe angewendet. Er umgab nämlich eine Lampe, wie sie von den Bergleuten gebraucht wird, mit einem feinen Netze aus Platindraht, welches verhindert, daß eine Flamme aus dem Innern der Lampe

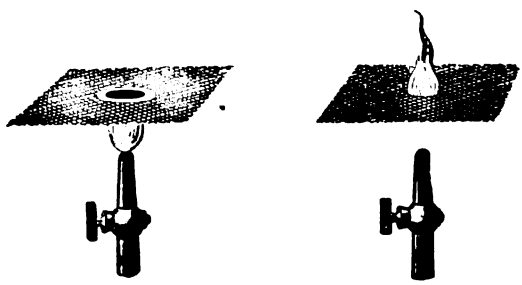


Fig. 317. Feine Metallnetze verhindern die Ausbreitung der Wärme.

herausschlagen kann. Kommen nun die Bergleute mit solchen Lampen in schlagende Wetter, d. h. in explodirende Gasarten, wie sie sich manchmal in Steinkohlenbergwerken ansammeln, so werden zwar die Gase, welche in das Innere der Lampe dringen, explodiren, die Explosion wird sich aber nicht weiter verbreiten.

Asbest und Amiant sind Mineralien, die durch ihre Unverbrennlichkeit eine gewiße Berühmtheit erlangt haben: diese Eigenschaft rührt daher, daß sie sehr schlechte Wärmeleiter sind, so daß man mit einem aus Amiant gewebten Handschuhe eine rothglühende Kugel in der Hand halten kann, ohne sich zu verbrennen. In diesem Falle breitet sich die Wärme nicht aus, weil sie auf einen zu schlechten Wärmeleiter trifft, im vorhergehenden Beispiele dagegen, weil sie auf einen zu guten Wärmeleiter traf, der sie zu schnell aufsaugte: in beiden Fällen war es der Grad der Leitungsfähigkeit, welcher die Ausbreitung der Wärme beschränkte.

Die Versuche, welche man angestellt hat um das Leitungsvermögen der Flüssigkeiten und Gase zu bestimmen, haben gezeigt, daß dasselbe sehr gering ist: und dennoch wird die Wärme auch durch Flüssigkeiten und Gase weiter verbreitet. Forscht man aber diesen Erscheinungen

Digitized by Google

etwas genauer nach, so sieht man, daß die Massen dieser Körper selbst beim Erwärmen in Bewegung gerathen, daß also nicht die Wärme durch sie hindurch geleitet wird, sondern daß die erwärmten Theile weiter wandern, und die Wärme mit sich weiter tragen. Die Ursache für diese Bewegung ist sehr leicht einzusehen: wird ein Theil der Flüssigkeit in der Nähe des Bodens erwärmt, so dehnt er sich aus, seine Dichtigkeit wird geringer und er erhebt sich in die oberen Theile des Gefäßes: an seine Stelle treten kältere Theile, die nun ihrerseits erwärmt werden und aufsteigen. Wird die Flüssigkeit von der Seite her erwärmt, so erfolgt ein ähnliches Strömen, aber in geringerem Grade, sodaß die Erwärmung eine längere Zeit in Anspruch nimmt: in jedem Falle aber kann man die Strömung sichtbar machen, wenn man der Flüssigkeit einen pulverförmigen Körper von nahezu gleichem specifischen Gewichte beimischt, wenn man in das Wasser z. B. Sägespäne bringt, in deren Bewegungen sich der Vorgang mit großer Deutlichkeit bemerklich macht. Dabei darf man aber nicht etwa meinen, daß die Flüssigkeiten gar kein Leitungsvermögen besäßen: denn als Despretz in einem cylindrischen Gefäße, in dem zwölf Thermometer in verschiedener Höhe durch die Wand eingelassen waren, Wasser von oben her erhitzte, so zeigten wenigstens die fünf oberen Thermometer eine, wenn auch geringe, Temperaturerhöhung an, die aber bis zur Mitte immer geringer wurde. Bei den sechs unteren Thermometern konnte dagegen keine Aenderung wahrgenommen werden, sodaß man sieht, daß das Leitungsvermögen des Wassers außerordentlich gering ist.

Gar kein Leitungsvermögen hat man bisher bei den luftförmigen Körpern wahrnehmen können, sodaß dieselben sicherlich die allerschlechtesten Leiter der Wärme sind: da sie sich aber im höchsten Grade beim Erwärmen ausdehnen, so ist ihre Circulation sehr lebhaft und auf diese Weise wird auch durch sie die Wärme im Raume weitergetragen. Wie diese Bewegung in der Atmosphäre im Großen vor sich geht, das werden wir im letzten Buche sehen: jetzt wollen wir nur an einen allgemein bekannten Versuch erinnern, der diese Bewegung anschaulich macht. Stellt man auf einen geheizten Ofen im Winter ein Brettchen, über welchem sich ein dünner Holzstab erhebt, der in eine feine Spitze endigt, und hängt man auf diese Spitze eine Spirale, die man aus einem Kartenblatt geschnitten hat, so zeigt diese Spirale durch ihre Umdrehungen

Digitized by Google

deutlich das Strömen der warmen Luft nach oben an. Ruhende Luft ist dagegen ein vortreffliches Hinderniß der Verbreitung der Wärme wie wir schon erwähnten, als wir von dem Schutze sprachen, den unser Körper von Wolle, Federn u. s. w. empfängt: derselbe Grund veranlaßt uns auch, die Fenster unserer Wohnungen im Winter zu verdoppeln, nur ist hierbei ein gutes Schließen derselben nothwendiges Erforderniß.

Drittes Kapitel.

Calorimetrie.

§ 1. Specifische und latente Wärme. Calorimeter.

Wird ein Körper um eine gewisse Anzahl Grade erwärmt oder abgekühlt, so sagen wir, daß er eine bestimmte Menge von Wärme gewonnen oder verloren hat; allein, wenn wir auch den Wechsel in der Temperatur am Thermometer ablesen, so wissen wir damit noch nichts über das Quantum von Wärme, welches dem Körper zugeflossen, oder von ihm ausgeflossen ist. Das Thermometer belehrt uns nur über die Temperaturveränderungen: wir werden aber bald sehen, daß sehr verschiedene Wärmemengen erforderlich sind, damit gleiche Gewichte verschiedener Stoffe um eine gleiche Anzahl Grade erwärmt werden; ja auch für einen und denselben Stoff ändert sich die erforderliche Wärmemenge, sobald gewisse Grenzen überschritten sind. Allein welche Vorstellung sollen wir uns von einem bestimmten Quantum Wärme bilden, da wir doch nur sehr wenig noch von dem eigentlichen Wesen der Wärme wissen? Wohl hat die Vergleichung mit dem Lichte die Ansicht immer mehr bestätigt, daß auch die Wärme eine Oscillationsbewegung ist, daß auch sie in Schwingungen des Aethers besteht: wie aber sollen wir es uns vorstellen, daß durch solche Schwingungen das Volumen der Körper sich vergrößert, daß eine Aggregatsform in die andere übergeführt wird? Dies sind Fragen, auf welche die Wissenschaft noch keine ganz bestimmte Antwort hat geben können, wenn sich auch die Vorstellungen über diesen Punkt in letzter Zeit einigermaßen geklärt haben, und wenigstens soviel jetzt feststeht, daß rein mechanische Processe Wärme erzeugen, und daß umgekehrt die Wärme in sichtbare Bewegung verwandelt werden kann, deren Größe sich auf mechanischem Wege messen läßt: mit einem Worte,

Digitized by Google

die Wärme kann als einfache Kraft angesehen und mit demselben Maße gemessen werden, mit dem man die anderen physikalischen Kräfte mißt, wovon wir am Ende dieses Buches eine Vorstellung zu geben versuchen wollen.

Ehe wir jedoch das Maß der Wärme aus einem anderen Gebiete, nämlich dem der Mechanik herzuleiten suchen, wollen wir die Wärmemengen selbst, welche entweder absorbirt oder entwickelt werden, wenn die Körper Aenderungen des Volumen oder des Aggregatzustandes erfahren, mit einander vergleichen und auf eine Einheit zurückführen, die uns durch die Aenderungen der Wärmeverhältnisse selbst geboten wird: diesen Theil der Wärmelehre bezeichnet man gewöhnlich als Calorimetrie.

Als Einheit der Wärme nimmt man jetzt allgemein die Wärmemenge an, welche erforderlich ist, um die Temperatur eines Kilogramms Wasser von 0^0 bis 1^0 zu erhöhen, und nennt dieselbe eine Calorie: sollen 2, 3, 4, ... Kilogramm Wasser von 0^0 auf 1^0 erhöht werden, so werden dazu 2, 3, 4, ... Calorien erforderlich sein. Ebenso nimmt man als erwiesen an, daß die Wärmemenge, welche ein Körper in sich aufnimmt, wenn er von einer Temperatur bis zu einer höheren erwärmt wird, genau ebenso groß ist, als diejenige, welche er wieder abgiebt, wenn sich seine Temperatur bis auf den vorigen Grad erniedrigt. Weiter hat man gefunden, daß die Wärmemenge, welche erforderlich ist, um die Temperatur eines Körpers um eine bestimmte Anzahl Grade zu erhöhen, von seiner Anfangstemperatur ziemlich unabhängig ist, ausgenommen wenn es sich um sehr große Temperaturunterschiede handelt: um also einen Körper von 0^0 bis 20^0 zu erwärmen, ist eine ebenso große Wärmemenge erforderlich, als wenn man denselben Körper von 50^0 auf 70^0 erwärmt. Gießt man in ein Gefäß, das selbst eine Temperatur von 25^0 besitzt, 1 Kilogramm Wasser von 0^0 und 1 Kilogramm Wasser von 50^0, und taucht man in diese Mischung, nachdem man sie umgerührt hat, ein Thermometer, so findet man eine Temperatur von 25^0. Die Wärmemenge, welche das Wasser von 50^0 an die andere Wassermasse abgegeben hat, genügt also, um diese letztere auf 25^0 zu bringen: gleichzeitig ist seine eigene Temperatur um 25^0 gesunken, woraus bewiesen ist, daß dieselbe Wärmemenge, welche das Wasser von 25^0 auf 50^0 bringt, gerade ausreicht, um die Temperatur eines gleichen Gewichtes Wasser von 0^0 auf 25^0 zu erhöhen.

Allein dieser Satz gilt nur innerhalb gewisser Grenzen, welche für

Digitized by Google

verschiedene Körper ungleich weit von einander entfernt sind. Mischt man z. B. 2 Kilogramm Quecksilber, von dem das eine eine Temperatur von 0°, das andere eine von 200° hat, so findet man nicht, wie man erwarten sollte, eine Mischungstemperatur von 100°, sondern das Thermometer zeigt eine Temperatur von 102,85° an. Das wärmere Quecksilber hat sich also nur um 97,15° erniedrigt, während sich das kältere um 102,85° erhöht hat: es ist also zu einer gleichen Temperaturerhöhung des Quecksilbers bei einer höheren Anfangstemperatur mehr Wärme erforderlich, als bei einer niedrigen.

Zu noch ganz anderen Resultaten gelangt man, wenn man verschiedene Stoffe mit einander mischt: bringt man in 1 Kilogramm Wasser von 0° 1 Kilogramm Quecksilber oder Terpentinöl von 100°, oder taucht man in dasselbe 1 Kilogramm Kupfer von 100°, so wird nach einiger Zeit ein Ausgleich der Temperatur stattfinden, indem die eingetauchte Substanz von ihrer Wärme so lange an das Wasser abgiebt, bis beide gleiche Temperatur besitzen, wobei die von den Stoffen abgegebene Wärmemenge gleich derjenigen sein muß, welche das Wasser in sich aufgenommen hat. Führt man nun diese drei Versuche aus, so findet man im ersten Falle eine Mischungstemperatur von nur 3,°, im zweiten Falle von 30°, und im dritten Falle von 8,6°. Während also das Quecksilber sich um 96,8° erniedrigt, hat sich das Wasser um nur 3,2° erhöht: um also gleiche Gewichte Quecksilber und Wasser um gleich viele Grade zu erhöhen, ist für das letztere ungefähr 30 mal so viel Wärme erforderlich, als für die erstere. Man bezeichnet dieses Verhalten dadurch, daß man sagt, die Körper haben verschiedene Wärmecapacität: um 1 Kilogramm eines bestimmten Körpers von 0° bis auf 1° zu erhöhen, ist daher ein gewisses Quantum Wärme erforderlich, welches man seine specifische Wärme nennt; beträgt also die specifische Wärme des Wassers 1 Calorie, so ist die des Quecksilbers $^1/_{30}$ Calorie. Gewöhnlich giebt man die specifische Wärme der Körper nach dem Verhältnisse an, in welchem sie zu der des Wassers steht, und sagt also kurz, daß die specifische Wärme des Quecksilbers $^1/_{30}$ ist.

Um die specifische Wärme fester und flüssiger Körper zu bestimmen, werden verschiedene Methoden angewendet. Die erste derselben, die wir erwähnen wollen, die Mischungsmethode, besteht darin, daß man den Körper, dessen Gewicht und Temperatur man sorgfältig gemessen hat,

Digitized by Google

in Wasser taucht, dessen Gewicht und Temperatur ebenfalls vorher bestimmt ist, und das auf allen Seiten von schlechten Wärmeleitern umgeben ist, und wartet, bis ein Ausgleich der Temperatur eingetreten ist, bis also ein eingetauchtes Thermometer seine Stellung nicht mehr ändert. Aus dem Verhältnisse der Aenderungen der Temperaturen läßt sich die specifische Wärme durch eine leichte Rechnung bestimmen. Hätte man z. B. in 10 Kilogramm Wasser von 20° eine Eisenmasse von 6 Kilogramm eingetaucht, die zuvor in siedendem Wasser gelegen hat und folglich eine Temperatur von 100° besitzt, und hätte man darauf eine Mischungstemperatur von 25° gefunden, so weiß man, daß die Temperatur des Wassers um 5° zugenommen, die des Eisen um 75° abgenommen hat. Sollen aber 10 Kilogramm Wasser um 5° erhöht werden, so sind dazu 50 Calorien erforderlich: das Eisen hat also an das Wasser 50 Calorien abgegeben, und seine Temperatur dabei um 75° erniedrigt. Hieraus schließen wir weiter, daß zur Erwärmung von 6 Kilogramm Eisen um 75° 50 Calorien, also zur Erwärmung eines Kilogrammes um 1° $^1/_9$ Calorie erforderlich ist: die specifische Wärme des Eisen ist daher $^1/_9$. Statt des Wassers kann man auch eine andere Flüssigkeit anwenden, wenn deren specifische Wärme bereits bekannt ist: nur darf zwischen derselben und dem eingetauchten Körper weder eine chemische, noch eine mechanische Einwirkung stattfinden. Für genaue Bestimmungen sind natürlich auch die Wärmemengen mit in Rechnung zu ziehen, welche an die Wände und das eingetauchte Thermometer abgegeben werden, und welche während des Versuches durch Strahlung verloren gehen.

Wir theilen jetzt die Werthe der specifischen Wärme für einige Körper mit und machen dabei noch besonders darauf aufmerksam, daß dieselbe für das Wasserstoffgas einen außerordentlich großen Werth besitzt, daß sie aber nächstdem für das Wasser bei weitem am größten ist:

Stoff	Specifische Wärme	Stoff	Specifische Wärme
Wasser	1,000	Kupfer	0,095
Wasserstoff	3,294	Silber	0,057
Terpentinöl	0,426	Zinn	0,056
Luft	0,267	Quecksilber	0,033
Schwefel	0,203	Gold	0,032
Glas	0,177	Platin	0,032
Eisen	0,114	Blei	0,031
Zink	0,098	Wismut	0,031

Digitized by Google

Hierbei darf man nicht vergessen, daß diese Werthe nur für die Temperaturerhöhung von 0° bis 1° gelten, und daß sie für höhere Temperaturen in der Regel etwas größer werden: so beträgt die specifische Wärme des Quecksilbers, deren Werth bei 0° 0,033 war, bei Temperaturen über 100° 0,035. Mit dem Aggregatzustande ändert sich die specifische Wärme sehr bedeutend und ist für die flüssige Form meistens am größten: so ist die specifische Wärme sowohl des Eises, als auch des Wasserdampfes ungefähr nur halb so groß, als die des flüssigen Wassers. Vergrößert man die Dichtigkeit der Metalle, z. B. durch Hämmern oder Walzen, so nimmt die specifische Wärme ab, und hiermit im Zusammenhange steht die Erscheinung, daß im Durchschnitt die dichtesten Metalle die geringste specifische Wärme besitzen.

Durch genaue Prüfung der specifischen Wärme der Körper sind Dulong und Petit zu einem sehr merkwürdigen Gesetze geführt worden, das auch in den Untersuchungen Regnault's volle Bestätigung fand, und das wir jetzt besprechen wollen. Es ist bekannt, daß, wenn die Stoffe chemische Verbindungen mit einander eingehen, dies nach ganz bestimmten Zahlenverhältnissen geschieht, und es ist für jeden einfachen Stoff eine Zahl gefunden worden, die man seine *Aequivalentzahl* nennt, und die angiebt, welches Gewicht dieses Stoffes mit einem bestimmten Gewichte eines zweiten Stoffes, das durch dessen Aequivalentzahl bemessen wird, eine chemische Verbindung eingeht. Beträgt die Aequivalentzahl des Quecksilbers 100, die des Schwefels 16, so heißt dies: 100 gr. Quecksilber und 16 gr. Schwefel verbinden sich chemisch und geben 116 gr. Zinnober. Fragen wir nun nach der Wärmemenge, die erforderlich ist, einmal um die Temperatur von 100 gr. Quecksilber, das andere Mal um die von 16 gr. Schwefel um 1° zu erhöhen, so findet man, unter Benutzung der Zahlen aus obiger Uebersicht, für Quecksilber 3,3, für Schwefel 3,248, also Zahlen, die nur wenig von einander abweichen. Aehnliche Resultate ergaben sich auch für andere chemisch einfache Stoffe, sodaß Dulong und Petit das folgende Gesetz aufstellten: *wird die Temperatur zweier Stoffe, deren Gewicht im Verhältnisse ihrer Aequivalentzahlen steht, um eine gleiche Anzahl Grade erhöht, so sind dazu gleiche Wärmemengen erforderlich.*

Aus den oben erwähnten Werthen ist zu ersehen, daß die specifische

Digitized by Google

Wärme des Wassers über viermal so groß ist, als die der Luft: wenn sich daher 1000 Kgr. Wasser um 1° abkühlen, so geben sie so viel Wärme ab, daß dadurch 4220 Kgr. Luft um 1° erwärmt werden können: und da die Luft bei mittlerem Barometerstande nur den 770. Theil so viel wiegt, als ein gleiches Volumen Wasser, so wird die Wärme, welche 1 Kubikmeter Wasser abgiebt, wenn er sich um 1° abkühlt, ausreichen, um die Temperatur von 3250 Kubikmetern Luft um 1° zu erhöhen. Aus dieser großen Wärmecapacität des Wassers, gegenüber der Luft, folgt, wie Tyndall in seinem Buche über die Wärme ausführlich erörtert, der ungeheure Einfluß, den die Nachbarschaft des Oceans auf das Klima ausübt: „Die Sommerhitze wird im Weltmeere aufgespeichert und während des Winters allmählich abgegeben. Dies ist theilweise der Grund, warum Temperaturextreme in einem Inselklima nicht vorkommen: der Sommer kann auf einer Insel niemals die brennende Hitze eines continentalen Sommers erreichen: hingegen ist aber auch der Winter auf einer Insel niemals so streng, als der des Continentes. An mehreren Orten des (europäischen) Festlandes wachsen (bei gleicher geographischer Breite) Früchte, welche bei dem englischen Sommer nicht reif werden, allein an denselben Orten ist das Immergrün Englands unbekannt, weil es dem dortigen Winter nicht widerstehen kann. Im Allgemeinen ist der Winter in Irland milder, als der der Lombardei." In dem letzteren Falle darf man aber auch den großen Einfluß nicht vergessen, den der Golfstrom ausübt, indem er den westlichen Küsten Europa's, besonders Englands und Irlands, beständig Wassermassen zuführt, die im Kessel des mexikanischen Golfes auf einen ziemlich hohen Wärmegrad gebracht sind.

Als wir im vorigen Kapitel vom Schmelzen und Verdampfen sprachen, haben wir jedesmal hervorgehoben, daß diese Vorgänge für jeden Körper bei einer ganz bestimmten Temperatur erfolgen, die von dem Hitzgrade der Wärmequelle, welche diese Erscheinungen veranlaßt, durchaus unabhängig ist, während nur die Geschwindigkeit, mit der die Aenderung des Aggregatzustandes erfolgt, sich nach der Menge der zugeführten Wärme ändert. So lange ein Stück Eis schmilzt, behält es die Temperatur von 0° unverändert bei, und alle Wärme, welche ihm zugeführt wird, so intensiv dieselbe auch sei, wird nur dazu verwendet, den festen Körper in den flüssigen Zustand überzuführen und darin zu erhalten. Ein ziemlich großes Quantum Wärme wird also von dem

Digitized by Google

Körper absobirt, ohne daß sich seine Temperatur erhöht: diese Wärme bewirkt keine Aenderung der Temperatur und ist daher durch das Thermometer gar nicht wahrzunehmen, sie hat sich gleichsam im Körper verborgen, und deshalb nennen wir sie *latente Wärme* und unterscheiden *latente Wärme der Flüssigkeiten* und *latente Wärme der Dämpfe*, ja nachdem dieselbe beim Schmelzen fester Körper oder beim Verdampfen der Flüssigkeiten absorbirt worden ist. Kehrt der Körper wieder in seinen vorigen Zustand zurück, erstarrt die Flüssigkeit oder condensirt sich der Dampf, so wird die vorher absorbirte Wärme wieder frei und theilt sich der Umgebung mit: und hieraus erklärt sich z. B., warum Wasser, das noch bei — 12° flüssig erhalten war, beim Erstarren plötzlich 0° zeigt.

Um die latente Wärme der Körper zu bestimmen, wendet man ähnliche Mischungsmethoden an, wie bei der Messung der specifischen Wärme. Mischt man z. B. 1 Kgr. Eis von 0° und 1 Kgr. Wasser, dessen Temperatur man zuvor auf 79,25° erhoben hat, so schmilzt das Eis, aber die Wassermasse, die sich bildet, zeigt nur eine Temperatur von 0°: alle Wärme, die in dem Wasser, das zugegossen wurde, enthalten war, und die 79,25 Calorien betrug, ist vollständig aufgebraucht worden, um das Eis zu schmelzen. Um also Eis von 0° in Wasser von 0° zu verwandeln, sind 79,25 Calorien erforderlich: die latente Wärme des Wassers beträgt daher 79,25. Läßt man alle Wärme einer constant fließenden Wärmequelle auf eine Eismasse wirken, so wird nach einer bestimmten Zeit das ganze Eis geschmolzen sein, das Wasser aber, das sich daraus gebildet hat, zeigt 0°: wartet man nun noch wieder ebenso lange Zeit, während die Wärme beständig in derselben Stärke fließt, so hat sich die Temperatur auf 79,25 erhöht: also im ersten Zeitraum gar keine Temperaturerhöhung, im andern eine Erhöhung von 79,25, trotzdem daß in beiden Zeiträumen eine gleiche Wärmemenge zugeflossen ist.

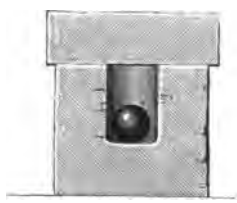


Fig. 318. Bestimmung der specifischen Wärme der Körper durch Schmelzen des Eises.

Diese Eigenschaft des Eises läßt sich benutzen, um die specifische Wärme der Körper zu bestimmen, und zwar kann man dabei z. B. folgendes Verfahren anwenden. In einem sehr dichten und gleichmäßig krystallisirten Eisblock, dessen obere Fläche sehr glatt ist, bringt man von

Digitized by Google

oben her eine Höhlung an, deren Wände man sorgfältig abwischt. In diese Höhlung legt man den zu prüfenden Körper, nachdem man zuvor sein Gewicht und seine Temperatur sorgfältig bestimmt hat, und deckt die Höhlung durch eine starke, glatte Eisplatte (Fig. 318). Indem nun der Körper von seiner Wärme so viel abgiebt, bis seine Temperatur auf 0° gesunken ist, wird durch diese Wärme eine Quantität Eis in Wasser verwandelt, welches man sammelt, um sein Gewicht zu bestimmen: so viele Kilogramme Wasser man findet, so oft hat der Körper 79,25 Calorien abgegeben, woraus sich seine specifische Wärme leicht berechnen läßt.

Fig. 319. Calorimeter nach Laplace und Lavoisier.

Nimmt man z. B. eine eiserne Kugel von 2 Kgr. Gewicht, die bis auf 35° erwärmt ist, so wird man finden, daß 100 gr. Eis geschmolzen sind: das Eisen hat also 7,925 Calorien abgegeben, also beträgt die Wärmemenge, welche 1 Kilogramm hergiebt, wenn sich seine Temperatur um 1° erniedrigt, hiervon den 70. Theil, oder die specifische Wärme des Eisens berechnet sich hiernach zu 0,113.

An Stelle des Eisblocks wird mit besserem Erfolge noch das Calorimeter angewendet, das von Laplace und Lavoisier erfunden wurde, und das in Fig. 319 dargestellt ist. Dieser Apparat besteht aus drei Blech-

Digitized by Google

gefäßen, die sich gegenseitig umhüllen, und von denen die beiden äußersten mit gehacktem, möglichst festem Eise gefüllt sind. Der Körper, dessen Wärmegehalt man prüfen will, kommt in das innerste Gefäß, sodaß durch seine Wärme etwas von dem Eise geschmolzen wird, das sich im mittelsten Gefäße befindet. Das Eis im äußersten Gefäße dient nur als Hinderniß für die Wärme, welche etwa von Außen eindringen und noch mehr Eis schmelzen könnte, als durch den eingesenkten Körper geschmolzen wird; das Wasser aber, welches sich durch das Schmelzen des Eises im mittleren Gefäße gebildet, wird durch einen Hahn abgelassen und gesammelt, und aus seiner Menge bestimmt man in der vorher erklärten Weise die specifische Wärme.

Während fast 80 Calorien erforderlich sind, um 1 Kilogramm Eis in Wasser zu verwandeln, während also im flüssigen Wasser 80 Calorien im gebundenen Zustande enthalten sind, welche auf das Thermometer nicht einwirken, absorbirt das Wasser, wenn es siedet, d. h. wenn es sich bei 100° in Dampf verwandelt, weitere 536 Calorien, also eine noch viel bedeutendere Wärmemenge, welche aber auch wieder frei und an die Umgebung abgegeben wird, sobald sich der Dampf condensirt. Daher die Bösartigkeit der Brandwunden, wenn die Verbrennung durch Wasserdampf erfolgte. Das Freiwerden der gebundenen Wärme des Wasserdampfes wird auch technisch vielfach benutzt, und besonders beruht darauf die Einrichtung der Dampfheizungen, indem ein verhältnißmäßig geringes Quantum Wasserdampf im Stande ist, eine ziemlich bedeutende Temperaturerhöhung in anderen Körpern zu bewirken.

§ 2. Quellen der Wärme. — Sonnenwärme.

Wenn irgend zwei Körper einander gegenüberstehen oder sich berühren, so findet zwischen beiden ein ununterbrochener Austausch von Wärme durch Strahlung oder durch Leitung statt, der auch dann noch kein Ende erreicht, wenn beide zu derselben Temperatur gelangt sind, indem dann nur für jeden sich Einnahme und Ausgabe decken: jeder Körper ist also, wie wir gesehen haben, stets für jeden anderen eine Quelle der Wärme. Allein dies ist es nicht, was man im gewöhnlichen Leben meint, wenn man diesen Ausdruck gebraucht, und so wollen auch wir jetzt unter Quellen der Wärme nur solche Körper verstehen, die eine genügend hohe

Digitized by Google

Temperatur besitzen, sodaß sie während einer gewissen Zeit oder auch unaufhörlich ihre gesammte Umgebung mit Wärme versorgen können. Zu diesen Wärmequellen gehören alle glühenden festen, flüssigen oder luftförmigen Körper, sowie die Körper, die sich in lebhafter chemischer Umwandlung unter Feuererscheinung befinden, also die Flammen: doch kann man auch solche Körper in diese Kategorie stellen, welche dunkle Wärme von hoher Temperatur aussenden, wie das siedende Wasser. Ferner rechnet man zu den Wärmequellen auch mehrere Vorgänge in der Natur, wie Reibung, Stoß, elektrische Entladung, kurz mancherlei physikalische, ebenso wie auch die meisten chemischen Processe, bei denen sich Wärme entwickelt, woran sich auch weiter viele physiologische Erscheinungen im Leben des Menschen und der Thiere anschließen. Die gewaltigste Quelle der Wärme aber, mit der sich keine irdische Quelle vergleichen läßt, und durch welche alles Leben auf der Erde erzeugt wird, ist die Sonne, und deshalb wollen wir auch mit ihr unsere Betrachtung beginnen.

Dieses Gestirn besteht aus einem weißglühenden Kerne, welcher von einer Gashülle umgeben ist, die viele der von ihm ausgesendeten Strahlen absorbirt, wie die Spectralanalyse gezeigt hat. Von welcher Beschaffenheit der Kern ist, ob er aus einer glühenden festen oder flüssigen Masse besteht, oder ob nur seine äußere, gasförmige Hülle, die Photosphäre, glüht, während das feste Innere dunkel ist, darüber herrscht noch keine Uebereinstimmung in den Ansichten; und ebenso ist man auch noch nicht vollständig im Klaren, wodurch die enormen Massen von Licht und Wärme, die von ihr ohne Unterbrechung in den Weltenraum ausgestrahlt werden, wieder ersetzt werden, da die Intensität dieser Strahlung sich, wie es scheint, seit Jahrtausenden nicht vermindert hat.

In welcher Stärke die Sonnenstrahlen zu uns gelangen, das hat John Herschel am Cap der guten Hoffnung und Pouillet zu Paris bestimmt, und wir wollen das Instrument, welches der letztere anwendete, und das er Pyrheliometer nannte (Fig. 320), jetzt beschreiben. Die Sonnenstrahlen treffen bei diesem Apparate zunächst auf den geschwärzten Deckel eines sehr niedrigen cylindrischen Gefäßes, das aus dünnem Silberbleche verfertigt und mit Wasser gefüllt ist. In dieses Wasser taucht die Kugel eines Thermometers, dessen Röhre durch einen Pfropfen im Boden des Cylinders hindurchgeht und in ein Messingrohr hineinreicht, das mit Schlitzen zur Ablesung des Thermometers versehen ist. Am

Digitized by Google

anderen Ende dieses Messingrohres, befindet sich eine Scheibe, deren Durchmesser dem des cylindrischen Gefäßes gleichkommt: dieselbe dient dazu, daß man erkenne, wenn die Sonnenstrahlen genau senkrecht gegen den Deckel des Gefäßes treffen, indem in diesem Falle der Schatten des Gefäßes die Scheibe genau treffen muß. Während der Versuche wird die Messingröhre und damit das Gefäß beständig um die Längsaxe gedreht und dadurch das Wasser im Innern immer gemischt, um zu verhindern, daß in demselben Temperaturunterschiede entstehen.

Fig. 320. Pyrheliometer nach Pouillet.

Nachdem man den Stand des Thermometers abgelesen hat, während sich das Instrument in einer geschützten Stellung befand, richtet man es auf irgend einen Theil des Himmels jedoch so, daß die geschwärzte Fläche von den Sonnenstrahlen nicht getroffen wird: in dieser Stellung wird es Wärme gegen den Himmel ausstrahlen, und man beobachtet nun, um wie viel das Thermometer in seinem Innern nach Verlauf einer bestimmten Zeit, z. B. fünf Minuten, gesunken ist. Hierauf läßt man die Sonnenstrahlen auch wieder fünf Minuten lang senkrecht auf den

Digitized by Google

geschwärzten Deckel fallen, und sieht, um wie viel das Wasser in dieser Zeit erwärmt wird. Zum Schlusse giebt man dem Instrumente die vorhergehende Stellung wieder, um zu sehen, ob sich die Strahlung in der Zwischenzeit nicht geändert hat; die erste und letzte Beobachtung sind nöthig, um zu wissen, wie viel Wärme das Instrument in der Zeit, daß es der Sonne ausgesetzt war, durch Strahlung verloren hat: der Mittelwerth dieser Strahlung ist zu der am Thermometer abgelesenen Temperaturerhöhung noch hinzuzufügen.

Die Wärmemenge, welche sich durch diese Versuche ergiebt, hängt natürlich von der Höhe der Sonne über dem Horizonte ab: denn ehe die Sonnenstrahlen die Oberfläche der Erde erreichen können, müssen sie die Luftschichten durchdringen, welche einen Theil derselben absorbiren; und zwar wird dieser Verlust um so größer sein, je länger der Weg ist, den die Strahlen in der Luft zurücklegen müssen. Aus den verschiedenen Werthen, die Pouillet beobachtete, suchte er ein Gesetz abzuleiten über die Absorption der Strahlen, wenn dieselben unter verschiedenen Winkeln die Atmosphäre durchschnitten, und aus der Anwendung dieses Gesetzes schloß er, daß, wenn die Strahlen senkrecht auffallen, doch mindestens der dritte Theil derselben von der Atmosphäre zurückgehalten wird. Da die Absorption bei einem schiefen Winkel noch bedeutender ist, so kann man annehmen, daß von aller Wärme, welche von der Sonne der Erde zugesendet wird, kaum die Hälfte bis zur Erdoberfläche gelangt, während die andere Hälfte nur die Temperatur der Atmosphäre erhöht.

Unter der Annahme, daß die Wärme, die zur Erde gelangt, gleichmäßig vertheilt sei, hat Pouillet berechnet, daß ein Quadratcentimeter in jeder Minute 0,441 Calorien erhält, d. h. eine Wärmemenge, welche genügen würde, um die Temperatur von 441 Gramm Wasser um 1^{0} zu erhöhen; jährlich würde demnach jeder Quadratcentimeter 231675 Calorien erhalten: die Wärmemenge aber, welche jährlich die ganze Erde trifft, würde genügen, um eine Eisschicht von 31 Meter Dicke, die den ganzen Erdball umgäbe, zu schmelzen. Aus der Wärmemenge, welche die Erde jährlich empfängt, kann man einen Schluß machen auf die Menge, welche überhaupt von der Sonne in den Weltenraum hinausgestrahlt wird: hierzu genügt zu berechnen, wie oft die Fläche eines größten Kreises der Erde in der Oberfläche der Kugel enthalten ist, welche die Sonne zum

Digitized by Google

Mittelpunkt und deren Abstand von der Erde zum Radius hat. Man findet, daß diese Kugel 2150000000 mal so viel Fläche besitzt als jener Kreis: woraus folgt, daß die Erde von aller Wärme, welche von der Sonne ausgestrahlt wird nur den 2150000000. Theil erhält. „Wenn die von der Sonne ausgestrahlte Wärme," sagt Tyndall, „benutzt würde, eine Schicht Eis zu schmelzen, die die Oberfläche der Sonne bedeckte, so würde das Eis in einer Stunde 2400 Fuß abschmelzen. Sie würde in der Stunde 700000 Millionen Kubikmeilen von eiskaltem Wasser zum Sieden bringen; oder mit anderen Worten, die von der Sonne in einer Stunde ausgegebene Wärme würde der gleich sein, die durch die Verbrennung einer Schicht fester Kohle von zehn Fuß Dicke, die die Sonne ganz umgäbe, erzeugt würde; so ist die in einem Jahre ausgestrahlte Wärme gleich der, welche die Verbrennung einer Kohlenschicht von 17 (engl.) Meilen Dicke ergeben würde."

Außer dieser ungeheuern Menge von Wärme, welche von der Sonne der Erde zuströmt und alles Leben auf ihr schafft, senden uns gewiß auch die anderen Fixsterne, die wir als ähnliche Quellen der Wärme und des Lichtes ansehen müssen, thermische Strahlen, sogut wie sie uns Lichtstrahlen senden, durch welche sie uns ja erst sichtbar werden: allein durch die ungeheure Entfernung werden dieselben in solchem Maße abgeschwächt, daß sie selbst mit unseren feinsten Meßinstrumenten sich nicht nachweisen lassen. Auch durch den Raum zwischen der Sonne und den Planeten, wie überhaupt durch den freien Weltenraum dringen alle diese Strahlen, und sind doch nicht im Stande, die Temperatur desselben auf eine mäßige Höhe zu bringen: denn nach Fourier beträgt diese Temperatur 60°, nach Pouillet aber sogar mehr als 140° unter dem Schmelzpunkte des Eises.

Endlich erhält die Oberfläche der Erde noch einen Wärmezufluß aus ihrem eigenen Innern: denn, wenn man in dem Erdboden eingräbt, so kommt man bei einiger Tiefe auf einen Punkt, wo sich die Temperatur während des ganzen Jahres constant auf derselben Höhe erhält; ein Thermometer zeigt dort beständig eine Wärme, die mit der Mitteltemperatur des Beobachtungsortes nahe übereinstimmt. Von diesem Punkte an nimmt die Temperatur bei größerer Tiefe zu, und zwar beträgt diese Zunahme 1° für etwa je 30 Meter, wie man durch viele Beobachtungen an verschiedenen Punkten, die sich bis zu einer Tiefe von mehr als

Digitized by Google

700 Metern erstrecken, bestätigt hat. Nimmt man nun an, daß diese Zunahme in gleicher Weise sich weiter steigert, so würde bei einer Tiefe von 3 Kilometern schon die Siedetemperatur des Wassers eintreten, bei 40 Kilometer Tiefe aber würden schon die meisten festen Körper geschmolzen sein, vorausgesetzt, daß sie daran nicht durch den großen Druck, der auf ihnen lastet, verhindert werden. Hieraus hat man schließen wollen, daß sich das Innere der Erde durchaus im feurig-flüssigen Zustande befinde, allein dieser Schluß ist doch nicht voll berechtigt, da er voraussetzt, daß die Wärmezunahme, die doch nur bis zur Tiefe von 700 Metern nachgewiesen ist, sich gleichmäßig bis zu jeder noch so großen Tiefe steigert: daher ist jene Annahme, so viel auch für sie sprechen mag, doch nur als eine Hypothese anzusehen, die erst der weiteren Bestätigung bedarf.

§ 3. Wärme, welche sich durch chemische Verbindung entwickelt.

Wenngleich die Sonne die ausgiebigste und billigste Wärmequelle ist, so ist sie doch nicht bequem genug, da wir nicht nach unserer Willkür über sie verfügen können, und gerade dann, wenn sie fehlt oder in ihrer Wirkung abnimmt, fühlen wir am meisten das Bedürfniß der Wärme: auch läßt ihre Wärme sich nur durch kostspielige Apparate so concentriren, daß sie eine sehr bedeutende Temperaturerhöhung bewirkt, während die Steigerung der Wärme, welche sie direct hervorbringt, doch verhältnißmäßig ziemlich schwach ist. Man kann wohl behaupten, daß an eine Civilisation nicht zu denken ist, so lange dem Menschen nur die Sonnenwärme zu Gebote steht, und er nicht andere künstliche Mittel aufgefunden hat, durch welche er sich selbst Wärme bereitet, um sich mit derselben die dringendsten Erfordernisse seiner Existenz zu verschaffen. Als solche Wärmequelle dient aber hauptsächlich die Verbrennung, d. h. derjenige Vorgang, bei welchem sich Körper mit Sauerstoff unter Lichtentwickelung verbinden, und den wir als Feuer bezeichnen.

So oft zwei Körper eine chemische Verbindung miteinander eingehen, wird in der Regel Wärme entwickelt: tropft man concentrirte Schwefelsäure in Wasser oder übergießt man gebrannten Kalk mit Wasser, so wird in jedem dieser Fälle, wie allgemein bekannt ist, eine ziemliche Menge Wärme frei, sodaß im ersten Beispiele bei unvorsichtigem Zu-

Digitized by Google

gießen die Gefäße springen, im andern aber ein heftiges Aufbrausen erfolgt. Meistens benutzt man aber zur Erzeugung der Wärme die Verbindung des Sauerstoffes unserer Luft mit gewissen festen oder flüssigen Körpern, welche unter Flammenerscheinungen erfolgt und zugleich Lichtstrahlen entwickelt. Soll ein Körper in freier Luft oder in reinem Sauerstoffgase brennen, so ist nöthig, daß man zuvor einen seiner Punkte in eine höhere Temperatur versetzt: mit einem Worte, man muß ihn anzünden. Hat der chemische Proceß einmal begonnen, so theilt sich die Wärme, die er entwickelt, von einem Punkte zum andern weiter mit, bis entweder das Gas, das die Verbrennung unterhält, vollständig aufgebraucht, oder bis der Körper, mit dem es sich verbindet, aufgezehrt ist. In dieser Weise erhalten wir das Feuer unserer Oefen und die Flammen unserer Kerzen und Lampen; und wir wissen recht gut aus der Erfahrung, daß diese Quellen der Wärme und des Lichtes nur so lange fließen, als man ihnen die beiden zur Verbrennung nothwendigen Elemente zuführt.

Fig. 321. Verbrennung des Eisen im Sauerstoffe.

Erfolgt die Verbrennung im reinen Sauerstoffe, so ist sie viel lebhafter, als in der freien Luft: taucht man in eine Glocke, welche mit jenem Gase erfüllt ist, eine Spiralfeder aus Stahl ein, an deren unterem Ende sich ein wenig brennender Feuerschwamm befindet (Fig 321), so sieht man, daß das Metall weißglühend wird und nach allen Seiten hin eine Menge brennender Funken ausspritzt.

Die Erscheinung der Verbrennung ist ziemlich zusammengesetzt, und wir können an dieser Stelle sie nicht in allen einzelnen Punkten verfolgen: wir wollen nur erwähnen, daß sich die eigentliche Flamme von den brennenden festen oder flüssigen Körpern deutlich abgrenzt. Soll ein Körper mit Flamme brennen, so müssen sich aus ihm unter dem Einflusse der hohen Temperatur gewisse Gase entwickeln, welche leuchtend werden und das bewegliche Licht der Flamme bilden. In der Flamme einer Kerze oder eines Gasbrenners lassen sich drei Regionen deutlich

Digitized by Google

unterscheiden, in denen die Licht- und Wärmeentwickelung in verschiedenem Verhältnisse zu einander stehen. Im äußeren Mantel erfolgt die Verbrennung am lebhaftesten, wodurch die Erwärmung am größten ist; allein die Lichtstärke ist nicht sehr bedeutend: hierauf folgt eine sehr glänzende Schicht, in welcher aber die Verbrennung weniger vollständig erfolgt, sodaß auch die Erhitzung nicht einen so hohen Grad erreicht; das starke Leuchten dieser Schicht rührt daher, daß in ihr sehr feine Kohlenstofftheilchen schweben, die sich im weißglühenden Zustande befinden. In das Innere der Flamme endlich kann der Sauerstoff der Luft nicht eindringen; daher werden die Gastheile hier nicht verbrannt, weshalb der Raum wenig Wärme besitzt und dunkel erscheint (Fig. 322). Erst wenn diese Theilchen an die Spitze der Flamme gelangen, beginnt auch ihre Verbrennung: ist dieselbe unvollständig, so erheben sie sich als Rauch. Bläst man lebhaft gegen die Flamme einer Kerze, so verlöscht sie: der Grund liegt darin, daß man einestheils einen kalten Luftstrom in sie einführt, anderntheils aber auch die glühenden Gase über einen größeren Raum verbreitet, wodurch sie sich so stark abkühlen, daß der Verbrennungsproceß ein Ende erreicht. Ist der Docht noch glühend geblieben, so kann man die Flamme dadurch wieder entzünden, daß man leicht dagegen haucht: dadurch ersetzt man den zur Verbrennung nöthigen Sauerstoff, und die Gase, welche sich aus dem glühenden Gase noch entwickeln, gerathen von Neuem in Flammen.

Fig. 322. Flamme einer Kerze.

Mit der Aufgabe die Menge der Wärme zu messen, welche sich beim Verbinden der Stoffe, und besonders beim Verbrennen entwickelt, haben sich viele Physiker wie Laplace, Lavoisier, Rumford, Despretz, Dulong, Fabre und Silbermann beschäftigt, d. h. sie haben gesucht, wie viele Calorien frei werden, wenn die Gewichtseinheit eines brennbaren Stoffes in Sauerstoff oder einem anderen, die Verbrennung unterhaltenden Gase verbrennt: diese Zahl von Calorien nennt man die Verbrennungswärme. Wir können die Methoden, welche die genannten Physiker anwandten, nicht im Einzelnen durchgehen, sondern wollen uns damit begnügen, einige der gefundenen Resultate mitzutheilen, um zu zeigen, wie verschieden sich in dieser Beziehung die Stoffe verhalten: wir

Digitized by Google

setzen dabei immer voraus daß von jedem der genannten Stoffe 1 Kilogramm verbrannt wird, und geben an, wie viele Calorien sich dabei entwickeln, d. h. wie viele Kilogramme Wasser um 1° erwärmt werden können. Man hat gefunden, daß Schwefel 2260, Kohlenstoff in Form von Diamanten 7770, als Graphit 7796, und endlich als Holzkohle 8080 Calorien liefert: verbrennt Wasserstoffgas in Chlor, so entwickelt es 23783, in Sauerstoffgas dagegen 34462 Calorien. Bei der Verbrennung des Wasserstoffes entwickelt sich die größte Wärme, und man hat berechnet, daß die Hitze einer Wasserstoffflamme auf 6800° steigt. Um mit dieser Hitze außerordentliche Erfolge zu erzielen, wendet man die sogenannten Knallgasgebläse (Fig. 323) an, bei welchen Wasserstoffgas und Sauerstoffgas durch zwei verschiedene Röhren in einen Raum geleitet und dort entzündet werden. Sainte-Claire Deville und Debray haben in solch einem Gebläse 1 Kilogramm Platin geschmolzen und dazu nur 70 Liter Sauerstoff und 120 Liter Wasserstoff verbraucht.

Fig. 323. Knallgasgebläse.

§ 4. Wärme, welche durch mechanische Thätigkeit entwickelt wird.

In vielen Fällen, die wir täglich beobachten können, sehen wir, daß auch durch rein mechanische Thätigkeit, durch Reibung, Druck, oder Stöße, Wärme ebenso entwickelt wird, wie durch jene Vorgänge zwischen den Atomen, in welchen die chemische Thätigkeit besteht. Reibt man einen Metallknopf gegen ein Zeug mit rauher Oberfläche, so wird er heiß; und ebenso erhitzen sich die Sägen, wenn sie das Holz durchschneiden, die Messer, wenn sie geschliffen werden, die Feilen und andere Instrumente, welche lebhaft gegen andere Körper gerieben werden. Schlägt ein Pferd mit dem Hufeisen heftig gegen das Pflaster, so sprühen Funken, ebenso wie am Schleifsteine des Scheerenschleifers, oder am

Digitized by Google

Stahle, der gegen einen Stein geſchlagen wird um Feuerſchwamm zu entzünden: in allen dieſen Fällen werden Stücken des Steines und des Stahles losgelöſt, welche durch die Heftigkeit des Schlages in Gluth verſetzt werden. Reibt man zwei Stücke trockenes Holz gegeneinander, ſo werden ſie warm und beginnen zu rauchen: ſollen doch in dieſer Weiſe die Wilden ſich Feuer verſchaffen. Drückt ein Drechsler ein zugeſpitztes Stück Holz heftig gegen einen hölzernen Gegenſtand, der auf der Drehbank ſehr ſchnell umgedreht wird, ſo wird das Holz verkohlt und bildet einen braunen Ring um den gedrechſelten Körper. Die Zapfen der Maſchinen und die Axen der Räder, beſonders an den Eiſenbahnwagen, erhitzen ſich ſehr ſtark durch die Reibung während der heftigen und anhaltenden Rotation: ſie würden bewirken, daß benachbarte Holztheile Feuer fangen, wenn ſie nicht immer gut geſchmiert würden.

Wir wollen hier an einen ſehr merkwürdigen Verſuch über die Wärmeentwickelung durch Reibung erinnern, den Rumford im Jahre 1798 anſtellte. Als dieſer Naturforſcher in München dem Bohren der Kanonen zuſah, ſtaunte er über die große Menge Wärme, welche ſich bei dieſer Operation entwickelte. Um dieſelben meſſen zu können, ließ er einen Metallcylinder, der gebohrt werden ſollte in einen mit Waſſer gefüllten Holzkaſten bringen, und beſtimmte zunächſt mit einem Thermometer die Temperatur des Waſſers. Nun ließ er mit dem Bohren beginnen, und ſchon nach einer Stunde war das Waſſer von der Anfangstemperatur von 16° bis auf 46° erwärmt, am Ende der zweiten Stunde zeigte das Thermometer 81°, und nach Verlauf von einer weiteren halben Stunde kochte die ganze Waſſermaſſe. „Es würde ſchwer fallen, ſagt Rumford, das Erſtaunen und die Verwunderung zu ſchildern, die ſich auf den Geſichtern aller Anweſenden ausdrückten, als ſie ſahen, wie eine ſo große Waſſermaſſe (von ungefähr zehn Liter) ohne das mindeſte Feuer erhitzt und zum Sieden gebracht wurde.“

Auch die Reibung feſter Körper an Flüſſigkeiten erzeugt Wärme, wie Joule durch einen ſchönen Verſuch gezeigt hat, auf den wir am Ende dieſes Kapitels wieder zu ſprechen kommen: und der Reibung gegen die Luftſchichten ſchreibt man es zu, daß die Meteorſteine, welche die Lufthülle unſeres Planeten mit ſehr großer Geſchwindigkeit durchſchneiden, weißglühend werden und halb geſchmolzen zu uns herabfallen. Um eine Temperaturerhöhung nachzuweiſen, wenn ſich Luft an einer feſten Ober-

Digitized by Google

fläche reibt, lenkte Tyndall den Luftstrom, der einem Blasebalge entströmte, gegen eine Melloni'sche Säule und wies durch den Ausschlag der Nadel nach, daß sofort die Temperatur stieg.

Einen der merkwürdigsten und wichtigsten Versuche für diese Lehre aber hat Davy angestellt, indem er bei einer Temperatur von 0° zwei gut getrocknete Stücke Eis gegen einander rieb und durch das bloße Reiben soviel Wärme erzeugte, daß ein Theil des Eises sich in Wasser verwandelte. Diese Erscheinung machte die ältere Ansicht, daß die Wärme ein besonderer Stoff sei, durchaus unhaltbar; denn nach dieser Theorie hatte man die Entstehung der Wärme durch Reibung so zu erklären versucht, daß man annahm, die Reibung vermindere die Wärmecapacität der Körper. Würden daher zwei Körper aneinander gerieben, so könnte nicht alle Wärme, welche zuvor in den Körpern aufgespeichert war, in den Körpern zurückbleiben, sobald durch die mechanische Thätigkeit die Lagerung der Molecüle abgeändert wird: ein Theil dieser Wärme würde daher frei und könnte nach außen hin wirken. Davy's Versuch hat nun diese Erklärung vollständig vernichtet, denn bei demselben wird ja Eis in Wasser verwandelt, dessen Wärmecapacität, wie wir bereits erwähnten, fast doppelt so groß ist, als die des Eises, und das außerdem bedeutende latente Wärme enthält, die dem Eise abgeht: woher sollte also diese Wärme kommen, da sich factisch die Capacität nicht verringert hat? Ganz anders gestaltet sich dagegen die Erklärung nach der neueren Theorie, nach welcher die Wärme eine Art von Bewegung ist: denn nach dieser Ansicht ist die Verwandlung der mechanischen Arbeit in Wärme nur ein Vorgang, bei welchem sich eine Bewegungsform in eine andere umgewandelt hat, wie dies auch sonst in der Natur sehr häufig geschieht; die Anschauung wird nur dadurch erschwert, daß die erste Bewegungsform sichtbar war, die zweite dagegen nur von den kleinsten Theilchen des Körpers ausgeführt wird, und sich dadurch der directen Beobachtung entzieht.

Auch Stoß und Druck entwickeln ebenso Wärme, wie die Reibung: schlägt man mit einem Hammer einen Nagel in ein Stück Holz ein, so erwärmt sich nicht nur der Nagel, was eine Folge der Reibung desselben gegen das Holz sein könnte, sondern auch der Hammer selbst zeigt eine Temperaturerhöhung. Eine Eisenstange bleibt viel länger glühend, wenn sie gehämmert wird, als wenn sie ruhig liegt, und auch Münzen werden beim Prägen durch den Druck, den der Stempel auf sie ausübt, heiß;

Digitized by Google

doch ist diese Temperaturerhöhung für die verschiedenen Metalle nicht von gleicher Größe. Im Allgemeinen hängt die Menge der Wärme, welche durch mechanische Thätigkeit entwickelt wird, von der Natur der Stoffe, die dieser Thätigkeit unterworfen werden, ferner von der Beschaffenheit ihrer Oberfläche, und endlich von der Stärke ihres Druckes ab.

Die Flüssigkeiten lassen sich nur in sehr geringem Maße zusammendrücken, erst wenn man sie einem Drucke von 30 bis 40 Atmosphären unterwirft, zeigen sie eine geringe Verminderung ihres Volumen: in diesem Falle hat man aber auch eine Steigerung der Temperatur nachgewiesen. Dagegen lassen sich Gasmassen leicht sehr stark zusammenpressen und zeigen dann, wenn diese Volumenänderung plötzlich geschieht, eine starke Erhöhung der Temperatur. Diese Erscheinung benutzt man beim pneumatischen Feuerzeug, welches wir auf S. 88 (Fig. 58) erwähnten. Wird dagegen ein Gas ausgedehnt, so sinkt seine Temperatur: wird Kohlensäure durch einen Druck von 50 Atmosphären in einem Gefäße zusammengedrückt, und läßt man dieselbe dann aus einer Oeffnung frei ausströmen, so dehnt sie sich so stark aus und kühlt sich dabei so weit ab, daß sie nicht blos in den flüssigen sondern selbst in den festen Zustand übergeht; diese feste Kohlensäure erscheint in schneeweißen Flocken, deren Temperatur 93° unter dem Nullpunkte liegt.

Auch wenn Wasserdampf aus dem Sicherheitsventile des Papin'schen Topfes ausströmt, kühlt er sich, wenn die Spannung im Topfe ziemlich bedeutend war, bei seiner Ausdehnung so stark ab, daß er sich in Form von Nebel condensirt: hält man die Hand in diesen Dampfstrahl, so hat man das Gefühl einer gewissen Frische, welche im ersten Augenblicke überrascht. Man muß sich aber wohl hüten, diesen Versuch anzustellen, wenn sich der Dampf nur beim gewöhnlichen Atmosphärendrucke entwickelt; denn in diesem Falle behält er die Temperatur von 100° bei, und man würde sich stark verbrennen, wenn man die Hand hineintauchte.

Wir können diese Aufzählung der Wärmequellen nicht abschließen, bevor wir nicht mit einem Worte erwähnt haben, daß auch die Lebensprocesse der organischen Körper, der Pflanzen, wie der Thiere, Wärme entwickeln, welche, wie es scheint, hauptsächlich ziemlich verwickelten chemischen Vorgängen bei der Ernährung und Athmung ihre Entstehung verdankt.

Digitized by Google

§ 5. Die Wärme als Bewegung. — Mechanisches Aequivalent der Wärme.

Bei den Betrachtungen, welche wir bisher anstellten, hatten wir zweierlei Arten von Erscheinungen zu berücksichtigen, welche einander gerade entgegengesetzt waren: das eine Mal beschrieben wir die verschiedenen Wirkungen, welche durch die Aenderungen der Temperatur hervorgebracht wurden; das andere Mal beschäftigten wir uns mit den Vorgängen, durch welche Wärme erzeugt wird. Es erübrigt nun noch zu zeigen, in welchem Zusammenhange diese beiden Größen, nämlich Wärmemenge und erzielte Wirkung, oder auch aufgewendete Kraft und erzeugte Wärme, zu einander stehen: denn daß ein Verhältniß, das sich in Zahlen ausdrücken läßt, zwischen ihnen besteht, haben die Untersuchungen der letzten Jahrzehnte in aller Strenge bewiesen, und das Aufsuchen dieses Verhältnisses hat einen ganz neuen Zweig der Wissenschaft ins Leben gerufen, nämlich die mechanische Wärmelehre.

Wir haben gesehen, daß die erste Wirkung der Wärme die ist, daß sie die Körper ausdehnt, d. h. daß sie Bewegungen der Molecüle erregt, durch welche der Abstand derselben sich vergrößert: betrachtet man aber die Erscheinung von diesem Gesichtspunkte aus, so kann man sagen, daß diese Wirkung nichts weiter ist, als ein mechanischer Vorgang. Erreicht die Steigerung der Wärme einen gewissen Grad, so ändert sich der Aggregatzustand der Körper: aus festen Körpern werden flüssige, aus flüssigen luftförmige; auch diese Erscheinung läßt sich als mechanischer Vorgang auffassen, denn es unterliegt keinem Zweifel, daß sich auch hierbei die Entfernung der Molecüle ändert, und daß sich besonders beim Verdampfen die Molecüle in einen viel bedeutenderen Abstand von einander entfernen, daß also auch hier mechanische Effecte erzielt werden. Noch viel deutlicher wird dies, wenn man beachtet, daß die Dämpfe und Gase bei steigender Temperatur immer stärker auf die Wände der Gefäße, in denen sie eingeschlossen sind, drücken; denn dieser Druck wird ja in unseren neueren mechanischen Motoren geradezu benutzt, um Bewegungen von bedeutender Energie hervorzubringen. In allen diesen Fällen verwandelt sich die Wärme in mechanische Kraft und vollbringt eine Arbeit, deren Größe in vielen Fällen genau bestimmt werden konnte.

Digitized by Google

Ebenso ist es ohne weiteres klar, daß in allen den Fällen, wo durch Reibung, Stoß oder Druck Wärme erzeugt wird, eine bestimmte Arbeit geleistet wird, die sich in Wärme verwandelt, deren Menge von der Größe der geleisteten Arbeit abhängt. Hieraus darf man wohl auch weiter schließen, daß in gleicher Weise bei den chemischen Vorgängen die Wärme dadurch erzeugt wird, daß die Molecüle eine gewisse Arbeit ausführen, die sich nur unseren Blicken entzieht.

Diesen Zusammenhang zwischen der Kraft, welche die Erscheinungen hervorruft, die wir als Wärmeerscheinungen bezeichnen, und der mechanischen Kraft, hat man schon seit Langem geahnt: unserer Zeit aber war es vorbehalten, diese vage und unklare Hypothese zu einer Theorie zu entwickeln, die sich auf die strengsten Untersuchungen stützt, und durch die schlagendsten Beweise bestätigt worden ist. Dem berühmten Arzte Mayer in Heilbronn gebührt das Verdienst, diese Theorie zuerst in klarer Form ausgedrückt und aus ihr die Consequenzen gezogen zu haben, und vom Jahre 1842 an beschäftigte er sich mit der Aufgabe, die Größe, durch welche das Verhältniß der Wärme zur mechanischen Kraft bestimmt wird, oder das mechanische Aequivalent der Wärme durch Versuche zu ermitteln. Bereits ein Jahr später wiederholte Joule die Versuche Mayer's mit zweckmäßigeren Apparaten und erlangte dadurch einen etwas genaueren Werth jenes Aequivalentes, und seit jener Zeit haben sich viele Physiker, besonders Clausius, Redtenbacher und Zeuner in Deutschland, Regnault und Hirn in Frankreich, Joule, Thomson und Rankine in England um die weitere Ausbildung dieser Theorie bemüht. Wir aber wollen jetzt versuchen, eine Vorstellung davon zu geben, was man unter dem mechanischen Aequivalent der Wärme versteht, müssen aber dazu erst den Begriff der Arbeit entwickeln.

Beginnen wir mit einem einfachen Beispiele: hebt Jemand eine Last von 1 Kgr. bis zur Höhe von 1^{m}, so vollbringt er eine bestimmte Arbeit; eine dreißigmal so große Arbeit aber wird er vollbracht haben wenn er entweder 1 Kgr. 30^{m}, oder 30 Kgr. 1^{m} hoch gehoben hat. Die Arbeit, welche beim Heben eines Gewichtes zu leisten ist, muß man daher sowohl nach der Größe des Gewichtes, als auch nach der Höhe, bis zu welcher das Gewicht gehoben ist, beurtheilen, d. h. man muß das Gewicht mit der Höhe des Hubes multipliciren. Als Einheit wählt man am besten die Arbeit, die geleistet ist, sobald man 1 Kgr. auf die

Digitized by Google

Höhe von 1m gehoben hat und bezeichnet dieselbe als Meterkilogramm: sind also z. B. 20 Kgr. 6m hoch gehoben, so ist eine Arbeit von 20 × 6 oder 120 Meterkilogrammen geleistet. Sollen wir eine Last heben, welche für unsere Tragkraft zu bedeutend ist, so können wir uns gewisser Maschinen bedienen, wie eines Flaschenzuges oder eines Hebels: wenden wir letztere Vorrichtung an, um z. B. eine Last von 60 Kgr. aufzuheben, indem wir in einer Entfernung anfassen, die sechsmal so groß ist, als der Abstand der Last, so brauchen wir nur soviel Kraft aufzuwenden, als ob wir 10 Kgr. heben sollten; allein während die Last 1m hoch gehoben wird, muß unsere Hand einen Weg von 6m durchlaufen, sodaß sie in Wirklichkeit eine Arbeit von 60 Meterkilogrammen geleistet hat. Sollen andere Arbeiten verrichtet werden, so läßt sich die Größe derselben immer auf jene Einheit zurückführen. Wird z. B. ein Lastzug von 40000 Kgr. auf einer horizontalen Bahn weiter bewegt, so ist während der ganzen Bewegung die Reibung zu überwinden: nehmen wir an, dieselbe betrage den 100. Theil der Last und der Zug sei 20m weit bewegt, so ist dieselbe Arbeit geleistet worden, als wenn man 400 Kgr. 20m hoch gehoben hätte, also ergiebt sich eine Arbeit von 8000 Meterkilogrammen. Schätzt man die Arbeiten in dieser Weise ab, so haben die Versuche übereinstimmend ergeben, daß immer dieselbe Arbeit geleistet wird, so oft man eine Calorie verwendet: die Arbeit, welche durch eine Calorie geleistet wird, nennt man das mechanische Aequivalent der Wärme. Wird umgekehrt durch eine mechanische Arbeit, welche diesem Aequivalent gleich ist, Wärme erzeugt, so beträgt dieselbe 1 Calorie.

Alle Versuche, welche man angestellt hat, um diese wichtige Zahl zu bestimmen, bestehen in der Hauptsache darin, daß man durch eine mechanische Thätigkeit Wärme erzeugte, und daß man einerseits die entwickelte Wärme, andererseits die aufgewendete mechanische Kraft möglichst genau bestimmte, indem man dabei natürlich die Verluste an Wärme und Kraft, die nicht zu vermeiden waren, mit in Rechnung zog. Von den Versuchen, welche Joule zu diesem Zwecke anstellte, wollen wir zwei jetzt besprechen.

Bei dem einen comprimirte er Luft mittels einer Druckpumpe in einem Metallgefäße, welches unter Wasser getaucht war, maß nach einer bestimmten Zahl von Kolbenzügen, durch welche die Luft einen Druck von mehreren Atmosphären erlangt hatte, den Grad der Erwärmung des

Digitized by Google

Wassers und leitete daraus die Wärmemenge ab, welche der Flüssigkeit mitgetheilt worden war. Die Erwärmung wurde nicht allein durch die Compression der Luft verursacht, sondern auch die Reibung des Kolben erzeugte Wärme: deshalb wiederholte er seinen Versuch, indem er das Metallgefäß mit der äußeren Luft in Verbindung setzte, und zog die Wärmemenge, welche er jetzt gefunden hatte, von der vorher bestimmten ab. Aus dem Reste berechnete er die Wärmemenge, welche durch die Arbeit erzeugt wurde, und fand daraus für das mechanische Aequivalent der Wärme einen Werth von 444 Meterkilogrammen.

Bei einem zweiten Versuche ließ er in Wasser oder Quecksilber ein Schaufelrad sich dadurch drehen, daß um die Axe desselben ein Faden geschlungen war, der über eine Rolle ging und ein Gewicht von bestimmter Größe trug (Fig. 324). Maß er nun einerseits die Temperaturerhöhung, welche durch die Reibung in der Flüssigkeit erzeugt wurde, andererseits die mechanische Kraft, welche aufgewendet war und deren Größe man dadurch findet, daß man das herabfallende Gewicht mit dem Wege, den es durchlaufen hat, multiplicirt, so ließ sich aus diesen Größen das mechanische Aequivalent der Wärme berechnen, und zwar fand Joule den Werth desselben aus diesen Versuchen gleich 432 Meterkilogrammen.

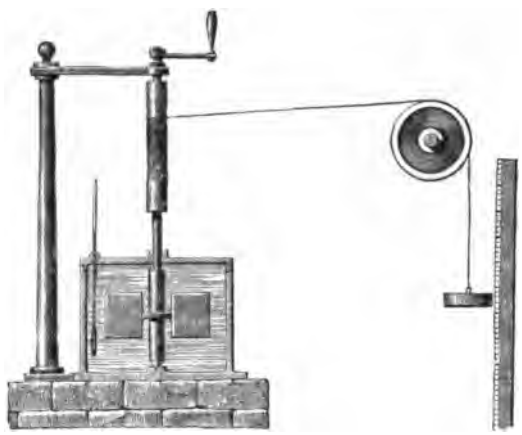


Fig. 324. Bestimmung des mechanischen Aequivalentes der Wärme durch ein Schaufelrad.

Zeuner hat aus vielen Versuchen, welche von verschiedenen Physikern angestellt worden sind, als wahrscheinlichsten Werth des Wärmeäquivalentes 425 Meterkilogramme gefunden: darnach würde also die Wärme, welche die Temperatur von 1 Kgr. Wasser um 1° erhöht, wenn sie vollständig in mechanische Kraft verwandelt würde, die Masse des Wassers bis auf eine Höhe von 425^{m} heben können; umgekehrt kann eine mechanische Kraft von 425 Meterkilogrammen, wenn sie zur Erwärmung von Wasser verwandelt wird, dasselbe nur um 1° erwärmen.

Digitized by Google

Hiermit kann man die Verwandlung der mechanischen Kraft in Wärme und der Wärme in mechanische Kraft als eine vollständig erwiesene Thatsache ansehen, welche jetzt auch allgemein in der Wissenschaft anerkannt wird: durch diese Ansicht aber werden die Ursachen für die Erscheinungen, die wir als Wärmevorgänge bezeichnen, in ein ganz anderes Licht gestellt. Schon die Untersuchung der Gesetze der Wärmestrahlung hatte uns dazu geführt, die Wärme für eine Wellenbewegung anzusehen, welche von dem Aether in derselben Weise ausgeführt wird, wie wir früher für das Licht gezeigt hatten. Dringt diese Bewegung nun in das Innere der Körper ein, so theilt sie sich wahrscheinlich den Molecülen derselben mit, und bewirkt, daß diese ihrerseits in Bewegungen gerathen, die sich darin äußern, daß bald die Körper ihr Volumen ändern, bald aus einem Aggregatzustande in den anderen übergehen, und bald Aenderungen in der Lagerung ihrer Molecüle erfahren. Treffen diese Bewegungen auf unsere Nerven, so verursuchen sie uns die Empfindung der Wärme.

Digitized by Google

Fünftes Buch.

Magnetismus und Elektricität.

Erstes Kapitel.

Die Magnete.

§ 1. Erscheinungen der magnetischen Anziehung und Abstoßung.

In der Nähe der Stadt Magnesia in Kleinasien fanden schon die Alten einen Stein, der durch seine Eigenthümlichkeiten ihre Aufmerksamkeit erregte, und den sie nach dem Fundorte als Magnet bezeichneten. Später hat man sein Vorkommen an sehr vielen Orten, wo sich überhaupt Eisenlager finden, besonders auf der Insel Elba und in Schweden beobachtet, und gefunden, daß er aus einer Verbindung von Eisenoxyd und Eisenoxydul besteht. Man bezeichnet diesen Stein, der gewöhnlich schwarz von Farbe ist und metallisch glänzt, in der Mineralogie als Magneteisenerz und gewinnt aus ihm sehr gutes metallisches Eisen. Für uns ist er aber dadurch von besonderer Wichtigkeit, daß er an gewissen Stellen seiner Oberfläche feine Eisentheilchen anzieht, eine Eigenschaft, die man auf eine Weise, welche wir später angeben werden, auch auf anderes Eisen, und besonders auf gehärteten Stahl von ihm übertragen kann: man bezeichnet solche Stahlstücke als *künstliche Magneten*, während man die vorhin erwähnten Steine, *natürliche Magnete* nennt. Das Eisen ist nicht der einzige Stoff, welcher von den Magneten angezogen wird, sondern dieselbe Wirkung zeigt sich auch bei mehreren anderen Metallen, nämlich dem Kobalt, Nickel, Chrom und Mangan. Auch Stücken von Gußeisen, Stahl und Eisenfeile, welche nicht selbst magnetisch

Digitized by Google

sind, werden wenigstens von den Magneten angezogen, weshalb man alle die genannten Körper unter dem Namen der magnetischen Substanzen zusammenfaßt.

Die Erscheinungen, welche wir jetzt beschreiben wollen, sind Jahrhunderte lang ebenso unbekannt geblieben, wie die Erscheinungen der Elektricität, trotzdem, daß schon die Alten die zwei wichtigsten Thatsachen kannten, welche in den Händen der späteren Beobachter zu Ausgangspunkten für zwei Zweige der Physik geworden sind, welche die jüngsten Forschungen wieder mit einander vereinigt haben. Die Anziehung leichter Körper durch den Bernstein und des Eisen durch den Magnet waren für jene nur Spielereien und Merkwürdigkeiten der Natur: jetzt sieht man sie, neben tausend anderen Erscheinungen, als zwei besondere Aeußerungen einer und derselben Kraft an, welche allerwärts verbreitet und beständig in der physischen Welt in

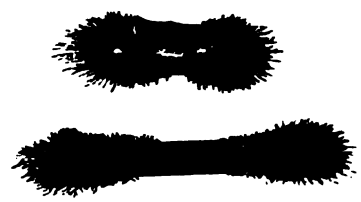


Fig. 325. Anziehung des Eisen durch einen natürlichen oder künstlichen Magneten.

Fig. 326. Magnetisches Pendel.

Wirksamkeit ist. Die Anziehung, welche natürliche oder künstliche Magneten auf das Eisen ausüben, läßt sich sehr leicht zur Anschauung bringen. Taucht man einen Magneten in Eisenfeilspäne oder Hammerschlag, so bemerkt man, wenn man ihn wieder heraushebt, daß sich an gewissen

Digitized by Google

Punkten ſeiner Oberfläche die Metalltheilchen in mehr oder weniger dichten Büſcheln angehängt haben (Fig. 325). Nähert man denſelben Punkten etwas größere Eiſenſtücke z. B. Schlüſſel, ſo ſieht man, wie dieſe dem Magneten lebhaft entgegenſpringen und ſich mit einer Kraft an ihn hängen, deren Stärke man nach der Anſtrengung beurtheilen kann, die nöthig iſt, um ſie wieder von ihm zu trennen. Auch mit Hülfe des magnetiſchen Pendels (Fig. 326), welches aus einer kleinen eiſernen Kugel beſteht, die an einem Faden hängt, kann man leicht die Anziehung des Eiſen durch den Magnet nachweiſen, ebenſo wie man mit demſelben Apparat zeigen kann, daß wirklich an den Punkten, wo

Fig. 327. Anziehung eines Magnetſtabes durch Eiſen.

ſich keine Eiſenfeile angehängt hatte, die Anziehung vollſtändig verſchwindet, daß ſie dagegen an den Punkten, wo ſich die dichteſten Büſchel befanden, ihren größten Werth beſitzt.

Die Anziehung zwiſchen Magnet und Eiſen iſt eine gegenſeitige: hängt man einen Magnetſtab an einem Faden horizontal auf, und nähert man ihn einem Stück nicht magnetiſchen Eiſen, ſo wird er von demſelben angezogen und dreht ſich nach ihm hin (Fig. 327). Die letzten Verſuche beweiſen zugleich, daß die magnetiſche Anziehung auch in die Ferne hin wirkt, und bei denſelben kann man beobachten, daß ſie wächſt, wenn die Entfernung abnimmt: nach welchem Geſetze, werden

Digitized by Google

wir später sehen. Bleibt die Entfernung dieselbe, so wird die Stärke der Anziehung durchaus nicht geändert, wenn man auch zwischen Magnet und Eisen andere Körper, gleichviel ob flüssige oder feste, einschaltet, wenn dieselben nur nicht aus magnetischen Substanzen bestehen. So kann man auf einem Blatte Papier, einer Glas-, Holz- oder Porzellanplatte Eisentheilchen sich bewegen lassen, wenn man einen Magnet darunter hin und her bewegt.

Wenn sich die natürlichen oder künstlichen Magnete einerseits und die magnetischen Substanzen andererseits gegenseitig anziehen, so darf man nicht etwa glauben, daß beide dieselben Eigenschaften besitzen: ein Hauptunterschied besteht schon darin, daß die blos magnetischen Substanzen

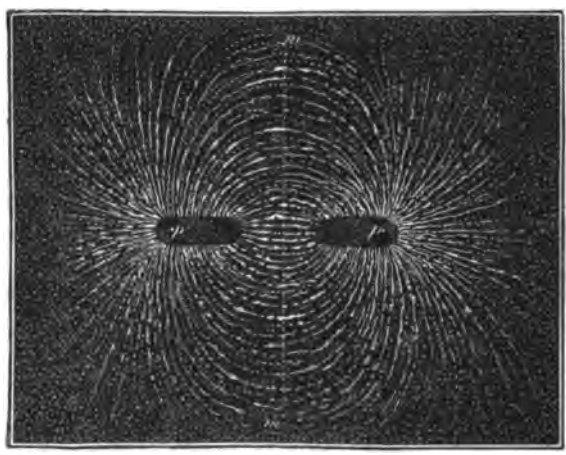


Fig. 328. Vertheilung der Eisenfeilspäne über einem Magneten.

sich nicht untereinander anziehen; ein Stück Eisen, welches einen Magneten anzieht, übt auf ein anderes Stück Eisen durchaus keine Wirkung aus, es müßte sich denn in der Nachbarschaft eines Magneten befinden. Ein anderer Unterschied besteht darin, daß das Eisen in allen seinen Punkten einen Magneten in gleicher Stärke anzieht, während in dem Magneten die anziehende Kraft immer ungleich vertheilt erscheint, sodaß gewisse Punkte gar keine Wirkung nach außen zeigen, während an anderen Punkten diese Wirkung einen größten Werth besitzt.

Durch das Eintauchen in Eisenfeilspäne (Fig. 325) haben wir uns schon überzeugt, daß es in jedem Magneten zwei Punkte giebt, in denen die Anziehung einen größten Werth besitzt, daß es aber zwischen ihnen eine Schicht giebt, welche durchaus keine Wirkung ausübt: wir nennen

Digitized by Google

jene beiden Punkte die Pole, diese Schicht aber die indifferente oder neutrale Schicht des Magneten. Von der Existenz der Pole und der neutralen Schicht kann man sich noch auf folgende Weise eine Vorstellung verschaffen: legt man auf einen Magneten, welcher die Form eines Stabes besitzt, ein Kartenblatt und bestreut man dasselbe mit Eisenfeilspänen, so sieht man, daß sich dieselben in regelmäßigen Strahlen um die Punkte p und p' gruppiren, welche den Polen des Magneten entsprechen, und krumme Linien bilden, die gegen die neutrale Schicht mm' symmetrisch gelagert sind (Fig. 328). Bisweilen kommt es vor, daß ein Magnet mehr als zwei Pole besitzt, was sich dadurch zeigt, daß sich nicht blos an seinen Endpunkten, sondern auch an anderen Punkten, die zwischen denselben liegen, Eisenfeile anhängt: stellt man den vorhergehenden Versuch mit einem solchen Magneten an, so erscheint jeder dieser

Fig. 329. Folgepunkte eines Magneten.

Punkte, welche man Folgepunkte nennt, als ein Centrum, von dem Strahlen von Eisenfeilspänen ausgehen, zwischen je zwei dieser Punkte aber zeigt sich immer wieder eine neutrale Linie (Fig. 329). Nicht magnetisirte Eisenstäbe dagegen besitzen weder Pole, noch neutrale Schichten: welchen Punkt derselben man auch dem Pole eines Magneten gegenüber hält, so wird immer Anziehung in gleicher Stärke stattfinden, während der Magnet nur in seinen Polen wirkt.

Bisher haben wir nur die Wirkung beachtet, welche ein Magnet auf nicht magnetisirtes Eisen, und umgekehrt, ausübt: fragen wir jetzt weiter, wie sich zwei Magnete gegen einander verhalten. Hängen wir mehrere Magnetstäbe so auf, daß sie in horizontaler Richtung frei schweben, und nähern wir denselben nacheinander einen bestimmten Pol M eines Magnetstabes, so zeigt sich, daß von diesem Pole M immer der eine Pol A jedes anderen Stabes angezogen, der andere Pol R abgestoßen wird

Digitized by Google

(Fig. 330). Alle die Pole A, welche vom Pole M Anziehung (Attraction) erfahren, heißen gleichnamige Pole, und ebenso sind die Pole R, auf welche der Pol M Zurückstoßung (Repulsion) ausübt, unter sich gleichnamige Pole, weil in beiden Fällen die Wirkung des Poles M, das eine Mal auf die Pole A, das andere Mal auf die Pole R, die nämliche ist. Hätte man bei dem Versuche statt des Poles M den anderen Pol N desselben Magneten benutzt, so würde man sehen, daß derselbe die Pole A zurückstößt und die Pole R anzieht: auf alle Fälle sind daher die Pole M und N eines und desselben Magneten nicht gleichnamige Pole, da sie gerade entgegengesetzte Wirkung hervorbringen.

Fig. 330. Anziehung und Abstoßung der Magnetpole.

Nähern wir nun zwei Pole A einander, von denen wir uns überzeugt haben, daß sie gleichnamige Pole sind, so werden wir beobachten, daß sie sich gegenseitig abstoßen; dasselbe wird der Fall sein, wenn wir zwei gleichnamige Pole R einander nähern. Stellt man dagegen zwei ungleichnamige Pole, also einen Pol A und einen Pol R einander gegenüber, so sieht man, daß sie sich gegenseitig anziehen, und zwar ist diese Anziehung viel stärker, als wenn wir an Stelle des einen Magneten ein nicht magnetisches Stück Eisen setzen wollten. Da wir vorausgesetzt haben, daß die Pole A vom Pole M angezogen, die Pole R dagegen abgestoßen wurden, so müssen wir schließen, daß der Pol M mit R und folglich N mit A gleichnamig ist. Wir können somit das Gesetz aussprechen: gleichnamige Pole zweier Magneten stoßen sich ab, ungleichnamige ziehen sich an.

Wir haben hiermit ein sehr wichtiges Unterscheidungsmerkmal zwischen den Magneten und der nur magnetischen Substanz aufgefunden, durch welches sich mit Sicherheit erkennen läßt, ob ein Stück Stahl oder Eisen magnetisch ist oder nicht: nähert man dasselbe einem schwebenden Magnetstab, und sieht man, daß jeder Pol desselben von jedem Punkte angezogen wird, so kann man mit Sicherheit schließen, daß das Stück unmagnetisch war: stößt dagegen irgend ein Punkt den einen der Pole ab, so befindet sich in ihm ein dem abgestoßenen gleichnamiger Pol.

Unter Magnetisirung versteht man diejenige Handlung, durch welche einer magnetischen Substanz die Fähigkeit ertheilt wird, Eisen und

Digitized by Google

andere magnetiſche Stoffe anzuziehen: jeder magnetiſirte Körper beſitzt mindeſtens zwei Pole und eine neutrale Schicht. Der Magnetismus eines Körpers kann entweder dauernd in demſelben bleiben, oder auch nur vorübergehend in ihm auftreten, um bald darauf wieder zu verſchwinden: auf die Art, wie man Stahlſtäben dauernden Magnetismus ertheilt, kommen wir ſpäter zu ſprechen, jetzt wollen wir zeigen, daß durch bloße Berührung oder Annäherung an einen Pol im weichen Eiſen vorübergehender Magnetismus erregt wird.

Fig. 331. Magnetiſirung durch Vertheilung.

Hängt man an einen Magnetſtab einen kleinen Cylinder aus weichem Eiſen, ſo wird dieſer ſelbſt zum Magneten; denn nähert man ſeinem unteren Ende einen zweiten eiſernen Cylinder, ſo wird dieſer von dem erſten angezogen und bleibt an ihm hängen: ebenſo zieht dieſer zweite Cylinder einen dritten an, und ſo fort, ſodaß man an einen Magnetpol eine ganze Kette von eiſernen Körpern hängen kann, deren jeder von dem vorhergehenden gehalten wird (Fig. 331).

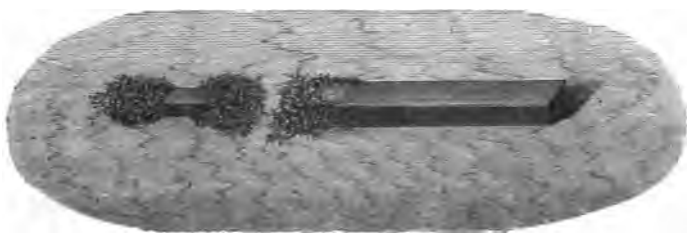


Fig. 332. Magnetiſirung durch Vertheilung in einiger Entfernung.

Sobald man aber den Magnet von dem erſten Stück Eiſen, welches an ihm hing, entfernt, ſo verliert ſowohl dieſes als auch jedes folgende ſofort ſeinen Magnetismus, und die Kette zerfällt ſogleich wieder in ihre einzelnen Glieder: durch die Berührung war das weiche Eiſen zum Magneten geworden, hatte aber ſeinen Magnetismus ſogleich wieder verloren,

Digitized by Google

als die Berührung aufhörte. Legt man sowohl den Magneten, als auch das weiche Eisen, welches unter seinem Einfluß magnetisch wird, horizontal auf einen Tisch und bedeckt man das Eisen mit einem Kartenblatte, so kann man durch aufgestreute Eisenfeile zeigen, daß dasselbe auch wieder zwei Pole und eine neutrale Schicht besitzt, welche aber näher an dem Pole liegt, der mit dem Magnetpole in Berührung ist.

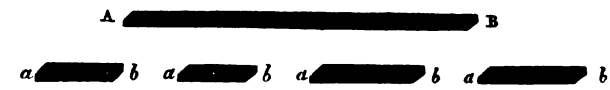


Fig. 333. Lage der Pole in den Bruchstücken eines Magneten.

Man bezeichnet diesen Vorgang gewöhnlich dadurch, daß man sagt, der Magnetismus sei im weichen Eisen durch den Einfluß des Magnetpoles vertheilt worden. Diese Vertheilung kann auch dann noch stattfinden, wenn zwischen dem Eisen und dem Magnetpole nicht unmittelbare Berührung stattfindet; groß darf freilich der Zwischenraum nicht sein: bis zu welcher Weite man aber das Eisen entfernen darf, ohne daß die magnetische Wirkung verschwindet, das hängt von der Kraft des Magneten ab (Fig. 332).

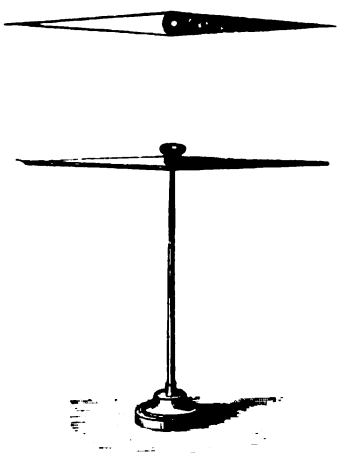


Fig. 334. Magnetnadel.

Zerbricht man einen Magnetstab in zwei oder mehrere Theile, so ist jedes Bruchstück, so klein es auch sein mag, doch wieder ein vollständiger Magnet mit zwei Polen und einer neutralen Schicht; nur die magnetische Kraft der Bruchstücke ist nicht mehr so groß, als die des ganzen Magneten, wie man sich leicht überzeugen kann, wenn man bestimmt, welches Gewicht an weichem Eisen der ganze Stab trug, und welches Gewicht von jedem Bruchstück noch getragen wird. In den einzelnen Stücken liegen die beiden Pole a, b, wieder nach denselben Seiten hin, auf welchen sich die entsprechenden Pole A und B des ganzen Magneten befanden: bringt man daher die Bruchstücke wieder in die Lage, in der sie sich vor dem Zerbrechen befanden, so werden immer ungleichnamige Pole an einander stoßen (Fig. 333).

Digitized by Google

Unter einer Magnetnadel (Fig. 334), verſteht man ein längliches Stück Stahl, welches ſo magnetiſirt iſt, daß es an jeder Spitze einen Pol, in der Mitte aber eine neutrale Schicht beſitzt, und welches ſo aufgehängt iſt, daß es ſich in einer horizontalen Ebene bewegen kann, indem es entweder an einem oder zwei Fäden befeſtigt iſt oder in der Mitte ein Agathütchen trägt, das auf einer Spitze ruht. Eine Magnetnadel, welche in dieſer Weiſe befeſtigt iſt, wird immer nach einigen Schwankungen ſich in einer beſtimmten Richtung einſtellen, welche ſich im Laufe der Zeit nur wenig ändert, indem die eine Spitze ungefähr nach Norden die andere nach Süden zeigt.

Dieſe Eigenſchaft der Magnetnadel, welche man als ihre Richtkraft bezeichnet, war wohl zuerſt den Chineſen bekannt, welche ſchon vor vielen Jahrhunderten bei ihren Reiſen durch die aſiatiſchen Wüſten Wagen benutzt haben ſollen, an denen kleine Figuren befeſtigt waren, die mit ihren ausgeſtreckten Armen beſtändig nach Süden zeigten. Auch die Araber haben die Magnetnadel ſchon ziemlich früh gekannt, und von ihnen iſt wahrſcheinlich ihr Gebrauch im zwölften oder dreizehnten Jahrhundert nach Europa gekommen. Seit jener Zeit iſt die Magnetnadel eins der wichtigſten Inſtrumente geworden, ohne welches ſich die Seefahrt niemals hätte freier entwickeln können.

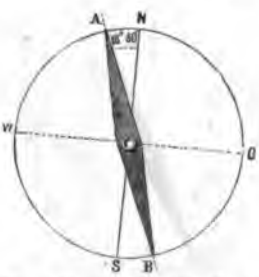


Fig. 335. Magnetiſche Declination zu Paris im Jahre 1864.

Die Nadel ſtellt ſich nicht ſo ein, daß der eine Pol ganz genau nach Norden zeigt, ſondern die Verbindungslinie beider Pole der Nadel weicht immer um einen gewiſſen Winkel von der Richtung des Meridianes ab: dieſen Winkel nennen wir die Abweichung oder Declination der Magnetnadel. Wir werden ſpäter erwähnen, wenn wir vom Magnetismus der Erde ſprechen, daß die Declination nicht an allen Orten der Erde dieſelbe iſt: in manchen Gegenden fällt die Richtung der Nadel mit dem Meridian zuſammen, in manchen weicht die Nordſpitze nach Oſten in anderen nach Weſten ab; auch für einen und denſelben Beobachtungsort ändert ſich die Declination im Laufe der Jahrhunderte. Jetzt iſt in faſt ganz Europa, den öſtlichſten Theil von Rußland ausgenommen, die Declination weſtlich, welche Richtung man als die negative Richtung rechnet und beträgt in Paris ungefähr $18^1/_2{}^0$: die

Digitized by Google

Linie der Magnetnadel bildet also mit der Mittagslinie den genannten Winkel, sodaß die Nadel ungefähr nach Nord-Nordwest zeigt (Fig. 335).

Daß sich die Magnetnadel beständig in eine gewisse Richtung einstellt, kann man leicht dadurch zeigen, daß man eine magnetisirte Nähnadel auf ein Stück Kork legt und dasselbe auf einer ruhigen Wasseroberfläche schwimmen läßt: sobald der Kork frei gelassen wird, dreht er sich um sich selbst, und kommt erst zu Ruhe, wenn die Nadel die bestimmte Richtung angenommen hat, ohne daß sie sich dabei von der Stelle bewegt. Die Verschiedenheit der beiden Pole zeigt sich hierbei auch dadurch, daß es immer derselbe Pol ist, der sich nach Norden kehrt, während der andere Pol beständig nach Süden zeigt: wir nennen deshalb den ersteren den Nordpol, den anderen den Südpol der Magnetnadel, und gebrauchen auch den Ausdruck, daß ein Magnet an dem einen Pole Nordmagnetismus, am anderen Südmagnetismus besitze.

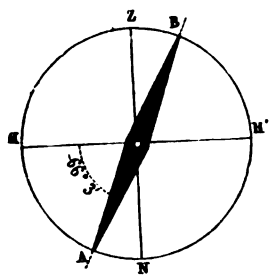


Fig. 336. Inclination der Magnetnadel zu Paris im Jahre 1864.

Befestigt man eine Magnetnadel nicht so, daß sie sich in einer horizontalen Ebene frei bewegen kann, sondern hängt man sie in ihrem Schwerpunkte so auf, daß sie um eine horizontale Axe in einer senkrechten Ebene sich frei auf und ab bewegen kann; giebt man dieser Axe ferner eine solche Stellung, daß sie auf der Richtung der Declinationsnadel senkrecht steht: so stellt sich die Nadel nicht horizontal ein, sondern ihr Nordpol sinkt herab, sodaß die Nadel mit der horizontalen Richtung einen Winkel bildet, den man die Neigung oder Inclination der Magnetnadel nennt. Nähert man sich dem Aequator der Erde, so wird die Neigung immer geringer, bis endlich an gewissen Punkten der heißen Zone ihre Stellung horizontal wird: jenseits dieser Punkte aber fängt der Südpol der Nadel an sich zu neigen. Je mehr man sich vom Aequator entfernt, desto stärker wird die Inclination, und in einer hohen nördlichen Breite giebt es einen Punkt, wo sich die Nadel senkrecht einstellt; diesen Punkt, welchen Capitän Roß erreicht hat, nennt man den Magnetpol der Erde. In Paris beträgt die Inclination jetzt ungefähr 66° (Fig. 336).

Hängt man eine Magnetnadel in ihrem Schwerpunkte so auf, daß

Digitized by Google

sie sich um eine horizontale Axe drehen kann, und bringt man das Axenlager in einer Gabel an, welche selbst an einem feinen Faden hängt (Fig. 337), so kann sich diese Nadel so einstellen, daß sie in die Richtung des magnetischen Meridianes kommt und zugleich die Neigung annimmt, welche für den Beobachtungsort stattfindet. Aus den erwähnten Versuchen folgt, daß die Erde auf einen Magneten einen ebensolchen Einfluß ausübt, wie wir ihn bei der Annäherung eines Magneten an einen anderen beobachtet haben: die Vorgänge sind dieselben, als wenn sich im Innern der Erde ein mächtiger Magnet befände, welcher selbst wieder zwei Pole besitzt. Hiermit soll aber nicht gesagt werden, daß die Existenz eines wirklichen Magneten, der aus einer Menge magnetischer Substanz gebildet ist, anzunehmen ist, sondern die Vorgänge sind in ganz anderer Weise zu erklären: und wir werden auf diesen Punkt zurückkommen, wenn wir erst von dem Einflusse elektrischer Ströme auf den Magneten gesprochen haben: daß wir die Erde mit einem Magneten vergleichen, soll also nur ein Bild sein, welches unserer Anschauung zu Hülfe kommt. Da die Magnetnadel ihren Nordpol stets nach Norden richtet, so müssen wir nach dem, was wir über Anziehung und Abstoßung der Pole gesagt haben, den Magnetismus, der sich in der Nähe des geographischen Nordpols der Erde befindet, als Südmagnetismus bezeichnen, während wir den Nordmagnetismus der Erde auf der südlichen Halbkugel zu suchen haben, dort, wohin die Südspitze der Magnetnadel weist. Diese Bezeichnungsweise ist bei den deutschen Physikern allgemein im Gebrauche: mehrere französische Physiker dagegen ziehen es vor, den Magnetpol der Erde, der sich in der Nähe des geographischen Nordpols befindet, ebenfalls als magnetischen Nordpol zu bezeichnen, woraus dann weiter folgt, daß die Spitze der Magnetnadel, welche nach Norden zeigt, deren Südpol genannt werden muß.

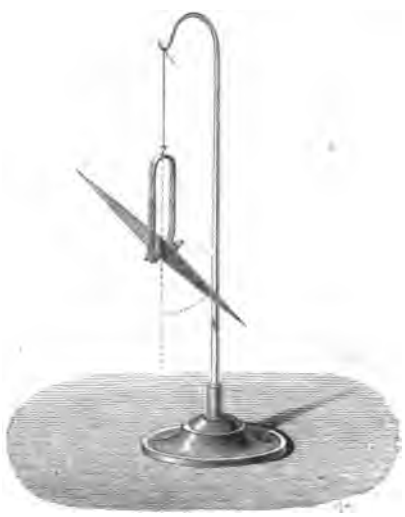


Fig. 337. Magnetnadel, an welcher sich zugleich die Declination und Inclination bestimmen läßt.

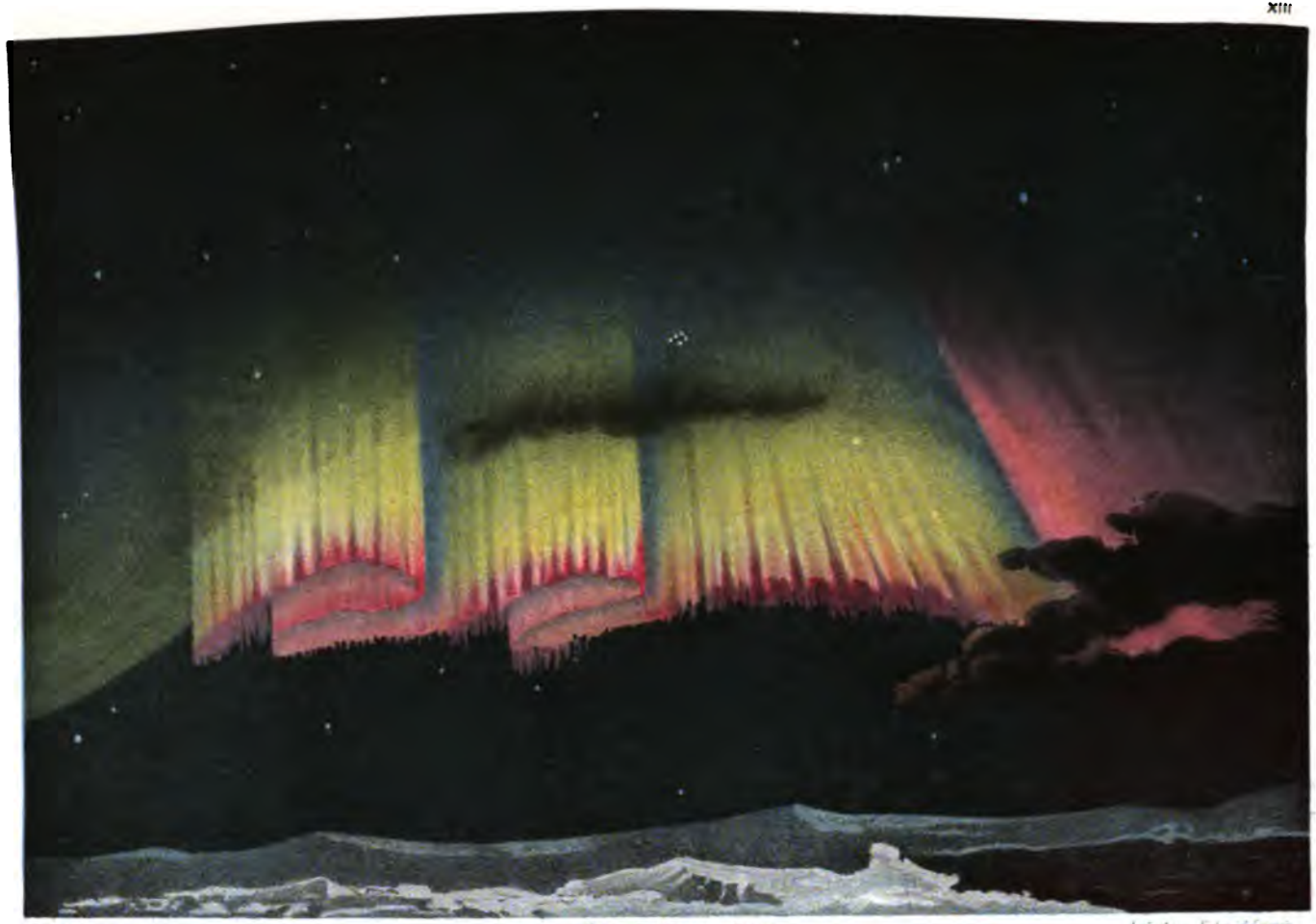
Digitized by Google

Inclination und Declination der Magnetnadel sind beständigen Aenderungen unterworfen, von denen einige einen periodischen Wechsel zeigen, während andere unregelmäßig auftreten: manchmal sogar sind diese Störungen so heftig, daß man annehmen möchte, die Erdkugel sei der Sitz förmlicher magnetischer Gewitter. Blickt man in solchen Fällen nach dem Himmel, so sieht man an demselben, wenn keine Wolken die Erde einhüllen, eine merkwürdige Lichterscheinung: das Nordlicht, auf welches wir im letzten Buche noch wieder zu sprechen kommen, und von welchem Tafel XIII eine Abbildung giebt.

Um die Stärke der Kräfte zu messen, mit welchen sich die Magnetpole anziehen oder abstoßen, wendete zuerst Coulomb die von ihm erfundene Drehwage auch auf diese magnetischen Kräfte an. Er hängte einen langen Magnetstab an einem Metalldraht so auf, daß der Draht durchaus keine Torsion besaß, wenn sich der Magnetstab in die Richtung des magnetischen Meridianes einstellte (Fig. 338). Drehte er nun den Draht, so wurde der Stab aus seiner ursprünglichen Richtung unter einem gewissen Winkel abgelenkt und stellte sich so ein, daß die magnetische Kraft, mit welcher der Stab in den Meridian zurückkehren will, der Torsion das Gleichgewicht hielt: für kleine Abweichungen kann man, wie Coulomb zeigte, diese Kraft dem Ablenkungswinkel proportional setzen. Bringt man hierauf in die Richtung des Meridianes einen zweiten Magnetstab in aufrechter Stellung, so, daß der eine Pol desselben dem gleichnamigen Pole des schwebenden Stabes gerade gegenüber steht, so werden sich diese Pole abstoßen und der bewegliche Stab wird bis zu einer gewissen Weite abgelenkt, in welcher die abstoßende Kraft beider

Fig. 338. Magnetische Drehwage nach Coulomb.

Digitized by Google



Nach Silbermann. Verlag v. Paul Frohberg, Leipzig. Lith. Anst. v. Schmid, Leipzig.

NORDLICHT

BEOBACHTET ZU BOSSEKOP (FINNMARK)

den 19 Januar 1839 Abends 7h 40m

Digitized by Google

LIBRARY
OF THE
UNIVERSITY
OF

Digitized by Google

Magneten durch die Richtkraft der Erde und die Torsion des Drahtes im Gleichgewicht erhalten wird. Nun dreht man den Draht an seinem oberen Ende in der Richtung weiter, daß die beiden Pole sich einander nähern müssen, und mißt für jeden Abstand, den die beiden Pole einnehmen, die Stärke der Torsion und damit die Intensität der Kraft, mit welcher sich die beiden Pole abstoßen. Auf diesem Wege hat Coulomb gefunden, daß auch die Intensität der magnetischen Kräfte mit dem Quadrate der Entfernung abnimmt.

Zu demselben Resultate gelangte er durch eine andere Methode: er ließ eine Magnetnadel, welche an einem Faden hing, unter dem Einflusse der Richtkraft der Erde schwingen und zählte, wie viele Schwingungen dieselbe in einer bestimmten Zeit, z. B. in einer Minute machte. Hierauf stellte er dem einen Pole der Nadel gegenüber in einer bestimmten Entfernung den ungleichnamigen Pol eines langen Magnetstabes auf: der Erfolg war, daß die Kraft, mit welcher die Nadel in der Richtung des Meridianes gehalten wurde, sich vergrößerte, und daß sie also in derselben Zeit eine größere Anzahl von Schwingungen ausführen mußte. Indem er den Versuch wiederholte, während der Stab bald in größeren bald in kleineren Entfernungen aufgestellt wurde, zeigte er, daß sich die Einwirkung des Poles mit dem Quadrate der Entfernungen änderte.

§ 2. Magnetisirung des Stahles.

Wenn eine Masse aus weichem Eisen mit dem Pole eines natürlichen oder künstlichen Magneten in Berührung kommt, so wird sie, wie erwähnt, sofort magnetisch, verliert aber ihren Magnetismus auch sogleich, nachdem sie vom Pole entfernt ist: anders dagegen verhält sich gehärteter Stahl, welcher kaum Spuren von Magnetismus zeigt, wenn er auch mit einem ziemlich kräftigen Magneten in Verbindung gesetzt wird. Will man ihm Magnetismus ertheilen, so muß man ihn wenigstens einige Zeit mit dem Pole des Magneten in Verbindung lassen: es wird dann an dem Ende, womit er den Pol berührt, ein ungleichnamiger, am entgegengesetzten Ende ein gleichnamiger Pol entstehen. Besser aber ist es noch, wenn man ihn

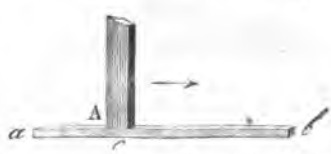


Fig. 339. Magnetisirung durch den einfachen Strich.

Digitized by Google

mit einem Magnetpole mehrmals streicht. Dazu bringt man den Stab, welcher magnetisirt werden soll, in eine feste Lage ab (Fig. 339), setzt den Pol A eines Magneten am Ende a fest auf und führt denselben über den Stab bis zum Ende b, wo man ihn abhebt. Hat man dieses Verfahren, welches der einfache Strich genannt wird, mehrmals wiederholt, so zeigt sich bei a ein Pol, der mit A gleichnamig ist, bei b dagegen der ungleichnamige Pol.

Viel schneller gelangt man aber zum Ziele, wenn man zwei Magnete zum Streichen anwendet, wie dies bei Duhamel's Methode geschieht. Man legt den Stab ab (Fig. 340) auf die Pole A′ und B′ zweier festliegender Magnete, setzt dann zwei andere Magnetstäbe in der Mitte

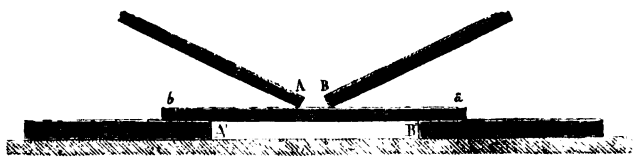


Fig. 340. Magnetisirung nach Duhamel's Methode.

von ab mit den entgegengesetzten Polen A und B so auf, daß sie gegen ab unter Winkeln von 25 bis 30° geneigt sind, und streicht mit denselben nach den entgegengesetzten Enden. Die Anordnung der Pole ist so zu treffen, daß A′ und A, und andererseits B′ und B gleichnamig sind; und es wird dann bei a ein Pol entstehen, welcher mit A gleichnamig ist, ebenso wie der Pol bei b mit B übereinstimmt. Wählt man bei diesem Verfahren, welches auch der getrennte Strich genannt wird, zum Streichen zwei Magnete von möglichst gleicher Stärke, so wird die Vertheilung des Magnetismus in ab eine sehr gleichmäßige, weshalb man es stets anwendet zur Magnetisirung von Stäben oder Nadeln, die zu feineren Untersuchungen dienen sollen. Für die Herstellung kräftiger Magneten und die Magnetisirung stärkerer Stäbe ist dagegen das Verfahren geeigneter, welches Aepinus angegeben hat, und das man als den Doppelstrich bezeichnet. Auch bei diesem Verfahren werden zwei Magnete mit entgegengesetzten Polen in der Mitte des Stabes, doch etwas steiler, etwa unter einem Winkel von 50° aufgesetzt, allein die

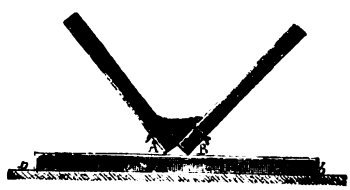


Fig. 341. Magnetisirung durch den Doppelstrich nach Aepinus.

Digitized by Google

Bewegung erfolgt in der Weise, daß beide Pole zusammen erst nach dem einen Ende des Stabes, dann der ganzen Länge nach bis zum anderen Ende, und so mehrmals hin und hergeschoben, und dann in der Mitte abgehoben werden. Damit die Bewegung gleichmäßig geschehe, sind die beiden Magnete fest mit einander verbunden (Fig. 341).

Stahlstangen und eiserne Stäbe kann man, ohne dabei einen künstlichen oder natürlichen Magneten zu benutzen, schon dadurch magnetisch machen, daß man sie in die Ebene des magnetischen Meridianes bringt und ihnen die Neigung giebt, welche die Inclinationsnadel besitzt: in dieser Stellung wird ein Stahlstab dauernd magnetisch, ein Stab aus weichem Eisen aber nimmt vorübergehenden Magnetismus an; in diesen Fällen wirkt die Erde genau ebenso, wie wir es früher von einem Magneten erwähnt haben, indem sie im Stahle oder Eisen den Magnetismus vertheilt. Hält man einen Stab aus weichem Eisen in der angegebenen Richtung, und schlägt man mit einem Hammer kräftig gegen das eine Ende desselben, so wird nicht allein der Magnetismus stärker, sondern er wird auch dauernd: ebenso werden Drahtstücke magnetisch, wenn man sie stark dreht, während sie sich in der Richtung der Neigungsnadel befinden; vereinigt man ein Bündel solcher Drähte, indem man die gleichnamigen Pole immer nach derselben Seite hin nimmt, so erhält man ziemlich kräftige Magneten. Schon wenn man den eisernen Stab in senkrechte Richtung bringt und gegen das eine Ende mit dem Hammer schlägt, wird er unter dem Einflusse des Erdmagnetismus selbst zum Magneten, da er sich in diesem Falle auch im magnetischen Meridian befindet, wenn er auch nicht die Richtung der Inclinationsnadel einnimmt. Aus dieser Einwirkung der Erde erklärt sich die Erscheinung, daß häufig Werkzeuge aus Stahl oder Eisen in den Werkstätten, in denen Metalle bearbeitet werden, sowie auch andere eiserne Geräthschaften, welche sich lange Zeit in einer geeigneten, z. B. senkrechten Lage oder in der Richtung des magnetischen Meridianes, befinden, selbst zum Magneten werden: so findet man häufig in den Schmieden magnetische Ambose, Hämmer und Zangen, und auch die eisernen Stäbe an Fenstern und Gittern, die Eisenbahnschienen, die in der Richtung von Süd nach Nord gelegen hatten, und besonders die Blitzableiter und eisernen Kreuze der Kirchthürme, sind gewöhnlich Magnete.

Wir werden bald Gelegenheit haben, davon zu sprechen, daß durch

Digitized by Google

den elektrischen Strom Magnetismus erzeugt wird: daß der Blitz das Eisen magnetisch machen kann, ist längst bekannt, und schon in der Encyklopädie von d'Alembert und Diderot findet man im Artikel über den Magneten folgende Stelle: „Der Blitz schlug einst in ein Zimmer ein, in welchem sich ein Kästchen mit stählernen Messern und Gabeln befand, die über das Meer versendet werden sollten; der Blitz drang in das Zimmer durch die südliche Ecke gerade dort ein, wo das Kästchen stand; mehrere Messer und Gabeln wurden geschmolzen und zerbrochen; andere, welche ganz blieben, waren sehr stark magnetisirt, sodaß sie große Nägel und eiserne Ringe tragen konnten, und diese magnetische Kraft war ihnen so stark eingeprägt, daß sie sich nicht verlor, selbst als man jene Körper rothglühend machte."

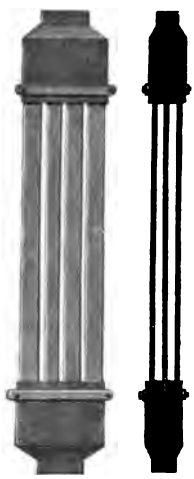


Fig. 342. Magnetisches Bündel aus 12 Stäben.

Mit der Zeit ändert sich die Kraft der Magnete, und starke Erschütterungen durch Schläge oder Stöße oder heftige Temperaturänderungen, endlich auch der Einfluß des Erdmagnetismus, sind Ursachen, durch welche der Magnetismus vollständig vernichtet werden kann. Der Grad, bis zu welchem derselbe gesteigert werden kann, hängt von der Größe, der Gestalt und dem Härtegrade des Magneten ab; hat man zwei Stahlstäbe von gleicher Gestalt aber verschiedener Größe, so ist die Stärke des Magnetismus den man beiden ertheilen kann, dem Volumen nicht proportional, sondern der kleinere nimmt einen verhältnißmäßig stärkeren Magnetismus an: sehr kleine Magneten kann man leicht so stark magnetisiren, daß sie das Hundertfache ihres Gewichtes tragen, was bei großen Magneten nicht gelingt. Aus diesem Grunde ist man auf dem Gedanken gekommen, an Stelle einfacher Stahlstäbe Bündel anzuwenden, in welchen mehrere magnetische Stäbe so vereinigt sind, daß ihre gleichnamigen Pole alle nach derselben Seite hin liegen: man nennt dieselben magnetische Bündel oder magnetische Magazine (Fig. 342). In der königlichen Sammlung in London befindet sich ein magnetisches Magazin, welches aus 450 Streifen von 40 cm Länge besteht und ein Gewicht von 440 Kilogrammen trägt.

Auch die Gestalt hat einen großen Einfluß auf die magnetische Kraft: so ist bei gleichem Gewicht eine Magnetnadel, welche in Spitzen ausläuft,

Digitized by Google

kräftiger als ein rechteckiger Stab. Ferner hängt der Magnetismus vom Härtegrade des Stahles ab: gehärteter Stahl nimmt den Magnetismus zwar schwerer an als weicher, läßt sich aber auch stärker magnetisiren und verliert nicht so leicht seine Kraft. Wird ein Magnet erhitzt, so ist seine Kraft vermindert, und verliert sich gewöhnlich vollständig, wenn die Erhitzung bis zur Rothgluth gesteigert wird. Ist die Erwärmung nicht übermäßig groß, so nimmt der Magnet beim Abkühlen seine volle Stärke wieder an. In derselben Weise, wie sich durch die Wärme die Eigenschaften der Magnete ändern, zeigen sich auch entsprechende Aenderungen bei denjenigen Stoffen, welche nur von dem Magnet angezogen werden, wie weiches Eisen, Nickel und alle die anderen oben genannten Körper. Weiches Eisen wird nicht mehr angezogen, wenn es bis zur Rothgluth, Gußeisen, wenn es bis zur Weißgluth erhitzt ist. Nickel ist nicht mehr magnetisch bei einer Temperatur über 350° und Mangan wird erst angezogen wenn es bis ungefähr 20° unter 0 abgekühlt ist, wie Pouillet gezeigt hat.

Fig. 343. Hufeisenmagnet mit Anker und Belastung.

Will man die Kraft eines Magneten in gleicher Stärke erhalten, so muß man mit seinen Polen immer Stücke aus weichem Eisen, welche man Anker nennt, in Berührung lassen und darf dieselben niemals mit Gewalt abreißen, sondern man muß sie, wenn man sie entfernen will, langsam zur Seite schieben. Hat man zwei Stäbe von gleicher Größe, so bewahrt man sie am besten auf, wenn man sie in einen Kasten parallel in einiger Entfernung neben einander legt, jedoch so, daß die ungleichnamigen Pole nach derselben Seite hin fallen: vor je zwei dieser Pole aber legt man Stäbe aus weichem Eisen, welche dicht an den Polen anliegen.

Will man eine sehr große Tragkraft erzielen, so giebt man den Magneten die Form von Hufeisen, wodurch die Pole derselben neben einander zu liegen kommen und legt vor beide einen gemeinsamen Anker (Fig. 343). Am besten ist es auch hier, wenn man statt eines einfachen

Digitized by Google

Magneten ein magnetisches Magazin aus mehreren hufeisenförmigen Platten oder Lamellen anwendet. Sehr kräftige Hufeisenmagneten erhält man nach Jamin's Vorschlage, wenn man dieselben aus vielen papierdünnen Stahllamellen zusammensetzt. Auch wenn man Stäbe von gleicher Größe zu zwei Bündeln zusammensetzt und dieselben so in einer Fassung befestigt, daß die entgegengesetzten Pole nach derselben Seite hin liegen, wie aus Fig. 344 zu ersehen ist, erhält man Magnete von großer Tragkraft. In allen diesen Fällen kann man die magnetische Kraft dadurch steigern, daß man den Magneten immer seinen Anker und eine daranhängende Schaale tragen läßt und daß man das Gewicht durch allmähliches Zulegen von sehr kleinen Körpern, z. B. von Schrotkörnern, steigert. Hierbei aber darf man das Gewicht nicht übersteigen, welches der Magnet überhaupt im günstigsten Falle tragen kann, weil sonst der Anker plötzlich abgerissen und dadurch die Kraft des Magneten bedeutend geschwächt wird.

Fig. 344. Magnet, welcher aus magnetischen Bündeln zusammengesetzt ist.

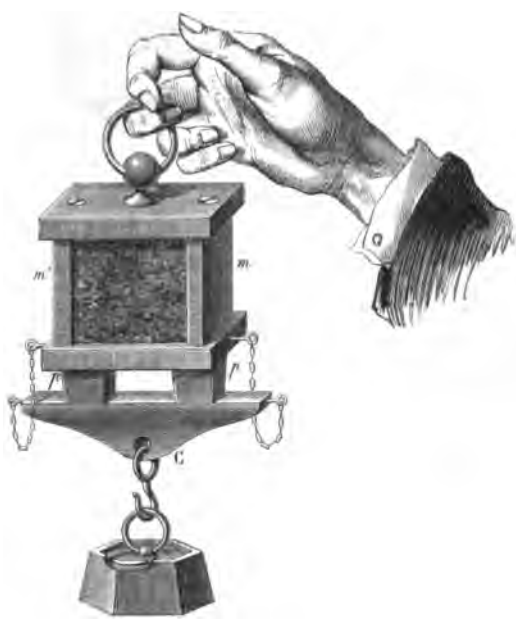


Fig. 345. Natürlicher Magnet mit Armatur.

Die natürlichen Magnete, welche aus oxydirtem Eisen bestehen, haben gewöhnlich nur geringe magnetische Kraft: man kann dieselbe aber steigern, wenn man auf den Seiten an welchen sich die Pole befinden, kleine Platten aus weichem Eisen vorlegt. Diese Platten m und m' (Fig. 345) endigen in etwas dickeren Knöpfen p und p', die nun als die eigentlichen Pole angesehen werden können und einen Anker tragen. Man nennt diese Platten, welche durch kupferne

Digitized by Google

Rahmen an den Magnetstein angedrückt werden, die Armatur des Magneten.

Zweites Kapitel.

Die Elektricität.

§ 1. Erscheinungen der elektrischen Anziehung und Abstoßung.

Die Alten kannten schon die Eigenschaft, welche der Bernstein annimmt, wenn er mit einem wollenen Stoff gerieben wird: sie wußten, daß derselbe leichte Körper, wie kleine Stückchen Stroh, Fasern einer Feder, anzieht, so daß diese zu ihm hin fliegen, als würden sie durch eine geheimnißvolle Kraft getrieben. Schon Thales von Milet erwähnt um 600 v. Chr. diese Erscheinung, und der Philosoph Theophrast fügt noch hinzu, daß auch der Gagat oder das Bergwachs dieselbe Eigenschaft besitzt. Auf diese beiden Vorgänge aber beschränkte sich die Kenntniß der Physiker über diese Erscheinungen mehr als zweitausend Jahre lang: und Plato bemerkt nur, daß der Bernstein wohl eine Seele haben müsse; Plinius aber sagt bei Erwähnung dieser Vorgänge, daß die Reibung im Bernsteine Wärme und Leben erwecke. Erst der englische Arzt William Gilbert, dem die Wissenschaft verschiedene Entdeckungen über die Eigenschaft der Magnete verdankt, erkannte um 1600, daß dieselbe anziehende Kraft, ebenso wie dem Bernsteine, auch dem Glase, dem Schwefel, den Harzen und vielen Edelsteinen eigenthümlich ist. Seit jener Zeit dehnten die Physiker die Untersuchungen Gilbert's immer weiter aus, förderten eine Menge der merkwürdigsten Erscheinungen an's Tageslicht, von deren Existenz man bis dahin noch nichts geahnt hatte, und begründeten dadurch einen neuen Zweig der Physik, die Elektricitätslehre, welche bis zu unseren Tagen eine ungeheure Ausdehnung und Wichtigkeit erlangt hat. Man bezeichnete die anziehende Kraft, welche zuerst bei diesen Erscheinungen beobachtet wurden, mit dem Namen der Elektricität, den man aus der griechischen Benennung des Bernsteins, Elektron, bildete, welche selbst von einem Zeitwort abgeleitet ist, das „ziehen" bedeutet.

Die ersten Erscheinungen, die man beobachtet hat, wieder zu zeigen, ist außerordentlich leicht: man reibe eine Stange aus Glas an seidenem

Digitized by Google

Zeuge oder ein Stück Schellack an Tuch und halte die geriebenen Stellen einige Centimeter hoch über kleine Stückchen Papier oder Stroh, so wird man sehen, daß sich diese leichten Körper lebhaft nach der Stange hin bewegen, ebenso wie sich die Eisenfeilspäne dem Magneten nähern; sobald aber die Körper die Stange berührt haben, so verwandelt sich die Anziehung in Abstoßung und die leichten Körper werden manchmal ziemlich heftig fortgeschleudert (Fig. 346). Hält man die geriebene Stange in kurzem Abstande vor das Gesicht, so hat man eine eigenthümliche Empfindung, als ob dasselbe mit Spinngewebe überzogen wäre. Nimmt man einen etwas größeren Stab und reibt man denselben etwas länger und ziemlich stark, so hört man, wenn man ihm den Finger nähert,

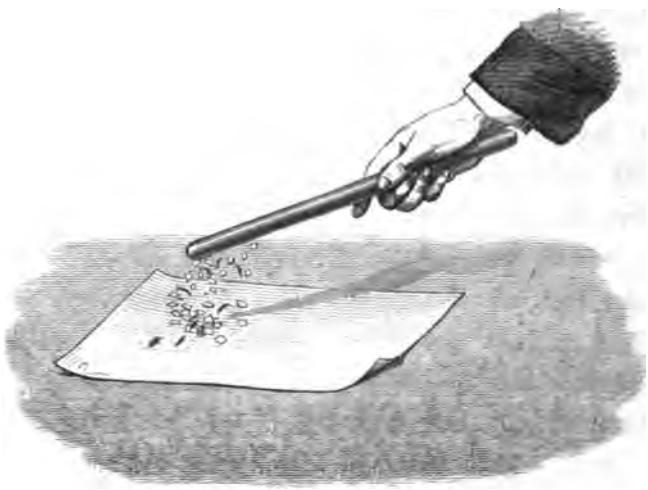


Fig. 346. Anziehung leichter Körper.

ein leises Knistern und im Finstern sieht man zwischen Stab und Finger einen kleinen Funken überspringen: alle diese Erscheinungen verschwinden, sobald man über die geriebenen Theile mit der Hand hinwegstreicht. Solange ein Körper die bei den vorhergehenden Versuchen erwähnten Eigenthümlichkeiten zeigt, sagen wir, daß er elektrisch ist; läßt sich nichts derartiges an ihm bemerken, so nennen wir ihn unelektrisch.

Lange Zeit glaubte man, daß die Körper in zwei Klassen zerfielen, nämlich in solche, welche durch Reiben elektrisch werden, und solche, welche diese Eigenschaft nicht besitzen; denn man hatte bemerkt, als man jene Versuche mit den verschiedenartigsten Stoffen wiederholen wollte, daß die Metalle, viele Steine, Stoffe aus der Pflanzen- und Thierwelt

Digitized by Google

und andere sich nicht dazu eigneten, die Erscheinungen hervorzubringen, welche man beim Bernstein, bei den Harzen, beim Glase und Schwefel beobachtet hatte. Allein ein Physiker des vorigen Jahrhunderts, Namens Gray, fand den Grund für diese Verschiedenheit und zeigte, daß sie nur von den Umständen bedingt wurde, unter denen man die Versuche anstellte.

Als Gray nämlich eine Glasröhre rieb, deren Ende durch einen Korkpfropfen geschlossen war, so bemerkte er, daß der Pfropfen selbst elektrisch wurde, während er doch gefunden hatte, daß Kork, wenn er für sich allein gerieben wird, keine Spur von Elektricität zeigt. Gray studirte nun weiter diese Uebertragung der Elektricität und zeigte, daß sie auf große Entfernungen hin sich bemerklich machte durch Vermittlung von Körpern, welche man bis dahin noch nicht durch Reiben in den elektrischen Zustand versetzen konnte, während sie nicht stattfindet durch Körper hindurch, welche selbst durch Reiben unter den bisher eingehaltenen Bedingungen elektrisch werden. Aus diesen neuen Versuchen ging hervor, daß manche Stoffe in verschiedenem Grade die Fähigkeit besitzen, einmal entwickelte Elektricität weiter zu leiten. Die Stoffe, von denen man bis dahin gezeigt hatte, daß sie allein fähig waren, Elektricität durch Reiben zu entwickeln, zeigten sich gerade als diejenigen, welche der Elektricität am wenigsten gut den Durchgang gestatteten: deshalb nannte man sie *schlechte Leiter*, während dagegen diejenigen Körper, die durch Reiben nicht elektrisch werden, *gute Leiter* der Elektricität sind.

Reibt man einen schlechten Leiter, wie z. B. Glas oder Harz, so entwickelt sich an den geriebenen Stellen Elektricität, welche sich aber nicht weit ausbreiten kann: berührt man dagegen eine solche Stelle mit dem Finger, der, wie überhaupt unser Körper, ein guter Leiter ist, so breitet sich die Elektricität von der Stelle, wo wir die Stange berühren, durch unsern Körper weiter aus, dringt in den Erdboden und verschwindet. Aus diesem Grunde wird eine Stange unelektrisch, wenn man mit der Hand über dieselbe hinwegstreift. Reibt man eine Metallstange, so kann die Elektricität, welche dadurch erzeugt wird, nicht in der Stange bleiben, da dieselbe ein guter Leiter ist, sondern sie wird sich durch unsern Körper hindurch in den Erdboden fortpflanzen. Befestigt man dagegen das Metall an einem Handgriff, der aus einem schlechten Leiter besteht, z. B. aus Schellack, und faßt man nur diesen Handgriff an,

Digitized by Google

während man das Metall gegen Tuch reibt, so wird dasselbe elektrisch und zeigt alle die vorhererwähnten Eigenthümlichkeiten. Wird daher ein guter Leiter von lauter schlechten Leitern eingeschlossen, so kann die Elektricität, die er enthält, nicht entweichen: man sagt dann, daß er isolirt ist, und nennt deshalb die schlechten Leiter auch Isolatoren.

Sowohl flüssiges Wasser, als auch Wasserdampf, ist ein guter Leiter der Elektricität: daher gelingen die elektrischen Versuche nicht, wenn die Luft sehr feucht ist, oder wenn sich auf den Körpern, welche isoliren sollen, eine dünne Schicht von Wasser niedergeschlagen hat. Um diesen letzten Uebelstand zu vermeiden, überzieht man alle Glastheile, über welche die Elektricität nicht hinweg geleitet werden soll, mit einer dünnen Schicht von Schellackfirniß, auf welchem sich das Wasser viel weniger leicht niederschlägt, als auf dem reinen Glase; außerdem wärmt man auch gern die Isolatoren vor den Versuchen, um alle Feuchtigkeit von ihnen zu entfernen. Kein Körper ist ein vollständig guter Leiter, keiner aber auch ein absoluter Isolator, deshalb kann man alle Körper in eine Reihe bringen, welche mit den besten Leitern beginnt und mit den besten Isolatoren endigt. Zu den besten Leitern gehören z. B. die nachgenannten Körper in folgender Reihe: die Metalle, geglühte Kohle, Graphit, gesäuertes Wasser, Brunnenwasser, der menschliche Körper, Wasserdampf; zu den besten Isolatoren rechnen wir: trockene Luft, Schellack, Kautschuck, andere Harze, Schwefel, Glas, Seide und Eis. Man sieht schon aus dieser Zusammenstellung, daß die elektrische Leitungsfähigkeit nicht allein von der chemischen Beschaffenheit der Körper abhängt, sondern daß sie auch von dem physikalischen Zustande, von der Lagerung der Molecüle bedingt wird: während Wasser und Wasserdampf Leiter sind, ist das Eis ein ziemlich guter Isolator. Ebenso leiten Schwefel und Glas, welche in dichten Massen gut isoliren, die Elektricität, wenn sie zu feinem Pulver zerstoßen sind. Noch auffälliger ist das Verhalten der Kohle: natürliche Steinkohle isolirt, wird sie dagegen geglüht, so leitet sie; reiner Kohlenstoff ist ein Isolator, wenn er krystallisirt als Diamant erscheint, dagegen ein Leiter, wenn er nicht krystallisirt als Graphit auftritt. Durch Erwärmung wird die Leitungsfähigkeit erhöht, und auch die besten Isolatoren, wie Glas, Schwefel und Schellack, werden bei hoher Temperatur Leiter.

Wenn wir uns jetzt mit der elektrischen Anziehung und Abstoßung

Digitized by Google

weiter beschäftigen wollen, so bedienen wir uns am besten eines sehr einfachen, aber sehr empfindlichen Apparates, den man als elektrisches Pendel (Fig. 347) bezeichnet: derselbe besteht aus einer kleinen Hollundermarkkugel, welche mittels eines seidenen Fadens an einem Träger hängt und folglich isolirt ist. Nähert man der Kugel eine geriebene Harzstange, so wird sie angezogen, nach der Berührung aber wieder abgestoßen; und so oft man nun auch die Harzstange nähert, so wird die Kugel immer wieder vor ihr fliehen. Die Kugel ist nämlich selbst elektrisch geworden, wie man leicht dadurch zeigen kann, daß sie von dem Finger, der ihr gegenüber gehalten wird, eine Anziehung erfährt; hat

Fig. 347. Anziehung und Abstoßung eines elektrischen Pendels.

man sie aber mit dem Finger berührt, so entweicht ihre Elektricität durch unsern Körper, und sie wird nun nicht wieder von Neuem vom Finger angezogen, noch von der Harzstange abgestoßen. Ganz derselbe Versuch gelingt in gleicher Weise, wenn man an Stelle der Harzstange eine Glasstange anwendet, und nichts deutet zunächst darauf hin, daß zwischen der Elektricität jener beiden Körper irgend ein Unterschied stattfindet. Sobald man aber diese beiden Stangen abwechselnd nacheinander benutzt, so zeigt sich sofort eine bedeutende Verschiedenheit: denn hat man die Kugel mit der Harzstange berührt, so daß sie nun vor derselben flieht, so wird sie von der Glasstange viel lebhafter angezogen, als

Digitized by Google

wenn sie unelektrisch in ihrem ursprünglichen Zustande wäre. Dasselbe findet statt, wenn man die Kugel mit der Glasstange berührt hat und ihr die Harzstange nähert.

Hieraus ergiebt sich, daß die Elektricitäten, welche auf der Harzstange und auf der Glasstange entwickelt sind, sich unter gleichen Umständen gerade entgegengesetzt verhalten: die eine zieht diejenigen elektrischen Körper an, welche die andere zurückstößt, und stößt die zurück, welche die andere anzieht. Daher hat man zwei Arten von Elektricität zu unterscheiden, welche von den ersten Entdeckern dieses Satzes mit den Namen der Harz- und Glaselektricität bezeichnet wurden: untersucht man andere Körper, so findet man, daß sich manche wie das Harz verhalten, andere dagegen wie das Glas.

Später hat man jene beiden Benennungen wieder aufgegeben, da es sich zeigte, daß ein und derselbe Körper bald die eine, bald die andere Elektricität annimmt, je nach der Natur des Stoffes, mit welchem er gerieben wird. Reibt man z. B. eine Glasstange gegen Wolle oder Seide, so zeigt sie Glaselektricität, gegen einen Katzenfell gerieben aber besitzt dieselbe Stange Harzelektricität; dieselbe Verschiedenheit erscheint beim Schellack, wenn derselbe das eine Mal gegen ein Fell, das andere Mal gegen eine mattgeschliffene Glastafel gerieben wird. Die Beibehaltung der vorigen Namen würde daher leicht Verwirrung herbeiführen, und man hat es deshalb vorgezogen, da die beiden elektrischen Zustände einander entgegengesetzt sind, die Glaselektricität als positive, die Harzelektricität als negative Elektricität zu bezeichnen. Werden irgend zwei Körper gegeneinander gerieben, und sind beide isolirt, so daß die Elektricität von keinem entweichen kann, so zeigt sich stets der eine positiv, der andere negativ elektrisch. Für beide Elektricitäten gelten folgende zwei Gesetze in gleicher Weise: Jeder elektrische Körper zieht leichte, nicht elektrische Körper an, gleichviel ob er positiv oder negativ elektrisch ist; und zwei elektrische Körper stoßen sich ab, wenn sie gleiche, ziehen sich aber an, wenn sie entgegengesetzte Elektricität besitzen.

Wird ein Körper durch irgend welches Mittel, durch Reiben oder durch Berührung mit einem anderen elektrischen Körper, mit Elektricität geladen, so kann die Frage entstehen, wie sich die Elektricität in seinem Innern vertheilt, ob sie sich überall hin in gleicher Stärke verbreitet

Digitized by Google

und die ganze Masse durchdringt. Handelt es sich um einen guten Isolator, so wissen wir schon, daß nur die geriebenen Punkte der Oberfläche elektrisch sind; bei solchen Körpern dagegen, welche nicht absolute Isolatoren sind, wird sich die Elektricität auch auf kleine Entfernungen hin von den geriebenen Punkten aus weiter verbreiten, ja sogar ein wenig in das Innere der Masse eindringen, wie dies z. B. beim Glas und den Harzen der Fall ist. Anders verhalten sich in dieser Beziehung die guten Leiter, wenn dieselben isolirt sind: jede noch so geringe Menge von Elektricität, welche ihnen zugeführt wird, verbreitet sich fast augen-

Fig. 348. Die Elektricität findet sich nur an der Oberfläche der Leiter.

blicklich über die ganze Oberfläche, wo sie sich aber nur in der äußersten Schicht vorfindet, ohne in das Innere einzudringen.

Um dies zu zeigen, befestigt man auf einem Glasfuße eine Metallkugel, gegen welche man zwei Halbkugeln aus dünnem Blech mittels isolirender Handhaben so andrückt, daß die Kugel möglichst vollständig von ihnen umschlossen wird (Fig. 348). Elektrisirt man nun die Kugel dadurch, daß man sie mit einem stark elektrischen Körper berührt, und hebt man dann die beiden Halbkugeln gleichzeitig und schnell ab, so zeigt sich, daß die Kugel durchaus unelektrisch ist, während die Halbkugeln dieselbe Elektricität zeigen, wie die Quelle, durch welche sie elek-

Digitized by Google

trisirt waren: die Elektricität hat sich also nur auf der Oberfläche verbreitet, im Innern findet sich keine vor. Bei allen diesen Versuchen läßt sich die Anwesenheit der Elektricität, wenn dieselbe nicht zu schwach ist, durch das elektrische Pendel nachweisen, vortheilhafter ist es freilich, feinere Meßinstrumente zu benutzen, welche wir aber erst später beschreiben können.

Dieselbe Thatsache ergiebt sich auch aus folgendem Experimente: Stellt man eine Metallkugel, in deren oberem Theile sich eine Oeffnung befindet, auf einem Glasfuße auf und elektrisirt man sie, so kann man

Fig. 349. Vertheilung der Elektricität an der Oberfläche der Körper.

zeigen, daß sich die Elektricität nur auf der äußeren Fläche, nicht aber in der inneren Höhlung vorfindet (Fig. 349). Man bedient sich hierzu eines sogenannten Probescheibchens, einer kleinen Metallscheibe, welche an einem langen Glasgriffe befestigt ist. Berührt man mit derselben das Aeußere der Kugel, so zieht sie das Pendel an, leitet man nun das Probescheibchen mit der Hand ab, und berührt man mit ihm das Innere der Kugel, indem man sich dabei wohl hütet, gegen den Rand der Oeffnung zu streifen, so zeigt sich an ihm durchaus keine Elektricität. Dieselbe Erscheinung zeigte Faraday an einem Cylinder,

Digitized by Google

der aus einem Metallgitter bestand und auf eine isolirte Messingscheibe gestellt wurde. Derselbe berühmte Physiker befestigte an einem isolirten Metallringe einen trichterförmigen Beutel aus Musselin, an dessen Spitze nach beiden Seiten hin Seidenfäden angebracht waren, durch welche der Beutel bald nach der einen, bald nach der anderen Seite gezogen werden konnte (Fig. 350). Elektrisirte er den Apparat, so zeigte sich die Elektricität nur immer auf der jedesmal äußeren Seite des Beutels; sie floß also stets von der einen Seite des Stoffes auf die andere, so oft auch der Beutel umgestülpt wurde.

Verfertigt man zwei Kugeln von gleicher Größe, die eine solid aus

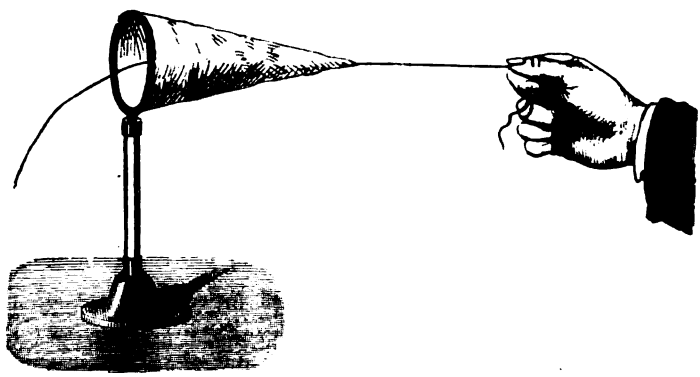


Fig. 350. Faraday's Versuch, welcher beweist, daß sich die Elektricität nur an der äußeren Fläche der Leiter ansammelt.

Metall, die andere aus Schellack, welches nur mit dem feinsten Blattgolde überzogen wird: isolirt man hierauf beide Kugeln, elektrisirt die eine, und bringt man endlich beide Kugeln in Berührung, so kann man durch feine Meßinstrumente zeigen, daß beide Kugeln, nachdem sie wieder von einander getrennt sind, genau gleiche Elektricität besitzen: es ist dies nur möglich, wenn auch bei der massiven Kugel die Elektricität nicht tiefer in das Innere eindringt, als bei der Kugel, welche nur eine ganz dünne leitende Schicht besaß. Die Tiefe, bis zu welcher die Elektricität in einen Leiter eindringt, kann daher nicht mehr betragen, als die Dicke des feinsten Goldblättchens.

Digitized by Google

§ 2. Gesetze der elektrischen Anziehung und Abstoßung. — Vertheilung der Elektricität auf der Oberfläche der Körper.

Wir haben gesehen, daß sich die Elektricität nur auf der Oberfläche der Leiter ansammelt und es entsteht nun die weitere Frage, ob sie sich in allen Punkten derselben in gleicher Stärke anhäuft und also überall gleiche anziehende und abstoßende Kraft besitzt: der Grad, in dem sie sich ansammelt und der nach der Kraft zu beurtheilen ist, welche sie äußert, heißt die Spannung der Elektricität. Man beantwortet diese Fragen am besten dadurch, daß man die einzelnen Theile der Oberfläche der Leiter mit einem Probescheibchen nach einander berührt und jedesmal untersucht, wie stark dieses Scheibchen elektrisirt ist, indem man hierzu, ähnlich wie beim Magnetismus eine Drehwage benutzt: d. h. man hängt an einem seidenen Faden einen Glasstab, der an seinen Enden kleine Kugeln trägt, auf, berührt die eine Kugel mit dem Probescheibchen und vergleicht die Stärke, mit welcher sie nach der Berührung abgestoßen wird, mit der Drehung des Faden. Mit dieser Vorrichtung hat man auch für die Wirkung der Elektricität folgende zwei Gesetze gefunden:

Die Abstoßung oder Anziehung zweier Kugeln von gleichem Radius, welche mit gleichnamiger oder ungleichnamiger Elektricität geladen sind, nimmt ab im Verhältnisse des Quadrates ihrer Entfernungen;

Die anziehenden oder abstoßenden Kräfte ändern sich proportional dem Producte der Elektricitätsmengen, welche beide Kugeln enthalten.

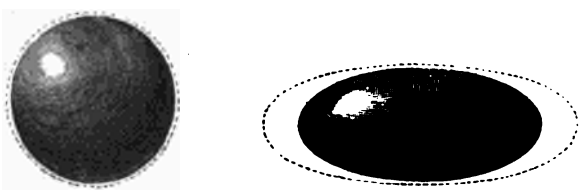


Fig. 351. Spannung der Elektricität auf einer Kugel und auf einem Ellipsoide.

Untersucht man die Spannung der Elektricität auf einem kugelförmigen, isolirten Leiter, so wird man finden, daß dieselbe in allen Punkten

Digitized by Google

von gleicher Stärke ist: denkt man sich daher die Elektricität unter dem Bilde einer Flüssigkeit, welche über die Oberfläche der Körper ausgegossen ist, so wird sie bei der Kugel eine Schicht bilden, welche überall von gleicher Dicke ist (Fig. 351). Bei einem Ellipsoide dagegen findet man in den Richtungen der großen Axen der Ellipsen eine stärkere, in den Richtungen der kleinen Axen eine geringere Spannung. Auf einer flachen Scheibe ist die Spannung im Mittelpunkte fast Null, und wächst nach den Rändern hin wo sie ihren größten Werth erlangt: ebenso sammelt sich die Elektricität bei einem cylindrischen Leiter, welcher durch Halbkugeln geschlossen ist, besonders auf den letzteren an, während sie an den übrigen Punkten, nur gering ist (Fig. 352).

Fig. 352. Spannung der Elektricität auf einer flachen Scheibe und auf einem Cylinder, der durch zwei Halbkugeln geschlossen ist.

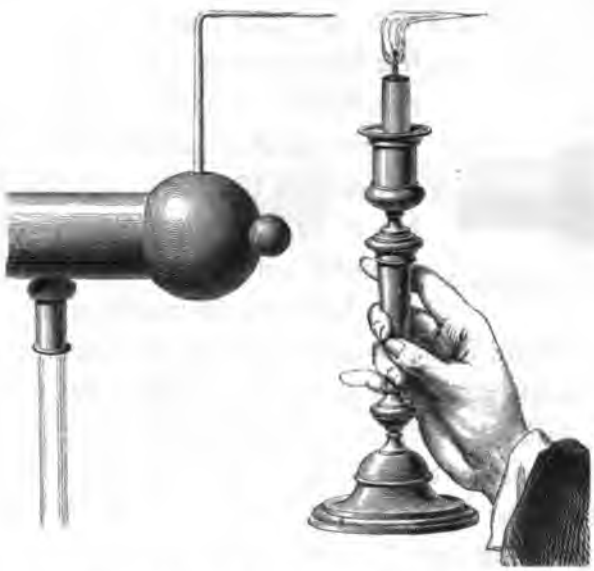


Fig. 353. Wind beim Ausströmen der Elektricität aus einer Spitze.

Man sieht, welchen Einfluß die Gestalt der Körper auf die Vertheilung der Elektricität auf ihrer Oberfläche besitzt: nirgends aber macht sich derselbe mehr geltend, als wenn ein Körper in Spitzen und scharfe Kanten ausläuft. An diesen Stellen häuft sich die Elektricität an und

Digitized by Google

erlangt eine solche Spannung, daß sie sich einen Weg sucht in das umgebende Mittel und in dieses ausfließt, selbst wenn dasselbe ein schlechter Leiter ist. Zwar verlieren auch Leiter, welche keine Spitzen und vorspringende Ecken haben, in jedem Mittel, das sie umgiebt, nach und nach ihre Elektricität: allein diese Abnahme erfolgt bei ihnen ziemlich langsam, um so langsamer, je besser das umgebende Mittel isolirt. Sind dagegen Spitzen vorhanden, so strömt die Elektricität mit Heftigkeit aus; die Rechnung hat nämlich ergeben, daß sich die Elektricität in einer Spitze in unbegrenztem Grade anhäufen müsse, was aber nicht stattfinden kann, ohne daß sie den Körper verläßt und sich im umgebenden Mittel zerstreut. Beobachtet man einen Leiter, der mit starker Elektricität geladen und mit einer Spitze versehen ist, im Dunkeln, so sieht man an derselben ein Lichtbüschel, dessen Form und Farbe wir später ausführlich besprechen; hält man der Spitze die Hand gegenüber, so fühlt man, daß die Luft in die strömende Bewegung mit hineingezogen wird, und man kann dieses Strömen der Luft sehr leicht dadurch sichtbar machen, daß man eine Lichtflamme in den Strom bringt, welche lebhaft zur Seite gebogen oder auch ganz ausgelöscht wird (Fig. 353). Früher glaubte man, daß es die Elektricität selbst sei, welche sich beim Ausströmen als Wind bemerklich mache: später hat man dafür aber die folgende Erklärung gefunden, welche mit anderen Thatsachen viel besser übereinstimmt. Auf die Lufttheilchen, welche mit der stark elektrischen Spitze sich in unmittelbarer Berührung befinden, geht etwas von der Elektricität der Spitze über: die Folge hiervon ist, daß sie mit Heftigkeit abgestoßen werden, da ihre Elektricität mit der Spitze gleichnamig ist. Ebenso werden nun die Lufttheilchen, welche an ihre Stelle treten, wieder geladen und abgestoßen, und in derselben Weise setzt sich der Vorgang fort, bis der Leiter seine Elektricität vollständig verloren hat. Bei diesem Strömen trifft aber die Luft auf einen Widerstand, welcher bewirkt, daß die Spitze selbst zurückgestoßen wird, wenn sie frei beweglich ist. Dies geschieht bei dem elektrischen Flugrade (Fig. 354), welches aus mehreren Metallstäbchen besteht, die alle an ihrem Ende nach derselben Seiten hin um-

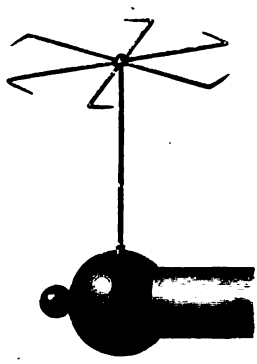


Fig. 354. Elektrisches Flugrad.

Digitized by Google

gebogen sind und in Spitzen auslaufen, an ihrem Grunde aber an einem Ringe befestigt sind, der sich frei um eine Axe drehen kann. Wird dieser Apparat auf einen stark elektrischen Leiter aufgesetzt, so dreht er sich in der Richtung, welche der Richtung der Spitzen entgegengesetzt ist.

Drittes Kapitel.

Die Elektrisirmaschinen.

§ 1. Elektricität durch Vertheilung.

Wir haben bisher zwei Mittel kennen gelernt, durch welche ein Körper elektrisch gemacht werden kann, nämlich die Reibung mit einem anderen Körper und die Berührung mit einem elektrischen Körper. Außer diesen beiden giebt es aber noch ein drittes, sehr wichtiges Mittel, um Elektricität in einem Körper hervorzubringen, die Vertheilung oder Influenz durch einen elektrischen Körper aus der Entfernung. Nähert man einen elektrischen Körper C, z. B. eine isolirte Metallkugel, die selbst durch Berührung mit einem anderen Körper elektrisch gemacht war, einem isolirten cylindrischen Leiter oder Conductor AB (Fig. 355), so bemerkt man an demselben schon bei der Annäherung des anderen Körpers deutliche Zeichen, daß er an seinen beiden Enden elektrisch geworden ist. Denn nähert man dem einen Ende ein elektrisches Pendel, so wird dasselbe zunächst angezogen, nach der Berührung aber von demselben Ende wieder abgestoßen. Um diese Beobachtungen bequemer ausführen zu können, errichtet man auf den Enden des Conductors Stäbchen a und b, an denen Hollundermarkkugeln an Seidenfäden hängen, welche die Anwesenheit der Elektricität sofort anzeigen, sobald der Körper C genähert wird. Untersucht man nun, welche Elektricität in

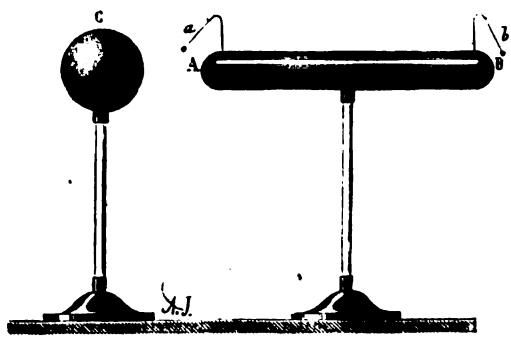


Fig. 355. Elektricität, welche durch Vertheilung hervorgerufen ist.

Digitized by Google

jedem Ende des Leiters sich vorfindet, so findet man, wenn die genäherte Kugel C positiv elektrisch war, daß in dem nächstliegenden Ende A des Conductors sich negative, im entfernteren Ende B positive Elektricität ansammelt: denn die Kugel a wird durch eine geriebene Harzstange, b durch eine Glasstange abgestoßen. Ist C negativ, so kehren sich die Verhältnisse um. Entfernt man den Körper C, ohne daß man zuvor den Conductur AB mit ihm oder auch mit irgend einem anderen Körper, z. B. dem Finger, berührt hat, so fallen die Kugeln ab sofort wieder zurück und AB zeigt sich durchaus unelektrisch.

Noch besser kann man diese Erscheinungen beobachten, wenn man unterhalb des Conductors an verschiedenen Stellen doppelte Pendel anhängt, deren Fäden nicht aus Seide bestehen, sondern aus einem Stoffe, der die Elektricität leitet (Fig. 356). Wird irgend ein Punkt des Conductors, an dem ein solches Kugelpaar hängt, elektrisch, so zeigt sich dies dadurch, daß sich die beiden Kugeln gegenseitig abstoßen, da sie dieselbe Elektricität enthalten, und der Abstand, bis zu welchem sie sich gegenseitig entfernen, ist zugleich ein Maß für die Stärke der Elektricität. Nähert man den elektrischen Körper C, so sieht man, daß die Kugeln an den beiden Enden von AB am stärksten divergiren, daß dann nach der Mitte zu die Divergenz ein wenig abnimmt, und endlich in einem Punkte M, welcher nahe bei der Mitte, jedoch ein wenig nach der Seite hin liegt, von welcher C genähert wird, verschwindet. Man sieht also, daß es auch hier in dem Leiter eine neutrale Schicht giebt, welche aber nicht genau in der Mitte liegt, und ebenso ist auch die Spannung an dem der Kugel zugewendeten Ende A etwas größer, als am anderen Ende B. Auch hier werden alle Zeichen der Elektricität in AB verschwinden, wenn man die Kugel C entfernt, oder auch, wenn man dieselbe aller Elektricität beraubt, indem man sie mit dem Erdboden in leitende Verbindung bringt.

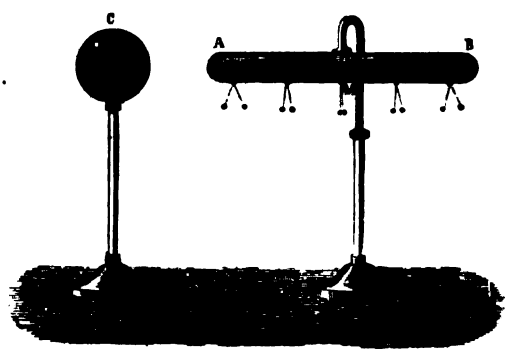


Fig. 356. Vertheilung der Elektricität in einem Leiter.

Digitized by Google

Leitet man nun den Conductor AB nach der Erde ab, während ihm die Kugel C gegenübersteht, so giebt man der gleichnamigen Elektricität, die sich in B sammelte, weil sie von C abgestoßen wird, Gelegenheit, sich zu entfernen: sie fließt also ab, dafür aber kann nun ungleichnamige Elektricität, die von C angezogen wird, zuströmen. Nun existirt keine neutrale Schicht mehr, sondern der ganze Conductor enthält nur noch die ungleichnamige Elektricität, welche in A ihre größte Spannung besitzt: und zwar ist dieselbe jetzt stärker, als zuvor, wie man daraus ersieht, daß die Kugeln sich noch weiter von einander entfernen. Unterbricht man nun wieder die Verbindung mit der Erde, so bleiben doch die Verhältnisse dieselben, und der Leiter enthält nur die Elektricität, welche der Elektricität in C entgegengesetzt ist, mit der größten Spannung in A. Entfernt man nun noch die Kugel C, oder leitet man sie zur

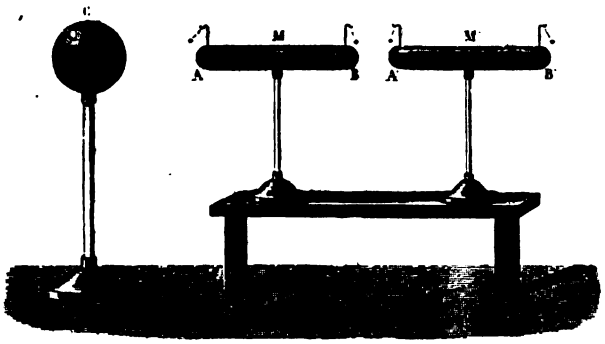


Fig. 357. Vertheilung der Elektricität in einer Reihe von Leitern.

Erde ab, so behält AB die einmal erlangte Elektricität; nur vertheilt sich dieselbe in der Weise, wie wir im vorigen Kapitel besprochen haben.

Stellt man einem elektrischen Körper C eine ganze Reihe von Conductoren AB, A'B' . . . gegenüber, einen hinter den anderen (Fig. 357), so wird die Elektricität gleichzeitig in allen vertheilt; allein die Stärke der Spannungen ist in den entfernteren immer geringer, als in den näheren. So ist die Elektricität in A'B' schwächer, als in AB, sie ist aber doch noch stärker, als wenn AB gar nicht vorhanden wäre: ein Beweis, daß jeder Leiter auf den nächsten wieder vertheilend wirkt.

Alle diese Erscheinungen hat man dadurch zu erklären versucht, daß man annahm, daß in jedem nicht elektrischen Körper beide Arten der Elektricität in gleicher Menge vorhanden sind und sich gegenseitig in

Digitized by Google

ihren Wirkungen hindern. Leiter und Isolatoren unterscheiden sich nur dadurch, daß sich in den ersteren beide Arten von Elektricität frei bewegen können, während sie in den letzteren in ihren Bewegungen gehindert sind. Reibt man zwei Körper gegen einander, so bewirkt man an den geriebenen Stellen eine Trennung der beiden Elektricitäten in jedem Körper, und es fließt die positive Elektricität in den einen, die negative in den anderen Körper und sammelt sich daselbst an. Nähert man einen positiv elektrischen Körper einem isolirten Leiter, so zieht er die negative Elektricität desselben an, stößt aber seine positive zurück, und bewirkt dadurch die Trennung derselben. Hierbei ist die Anziehung stärker, als die Abstoßung, weil sich die negative Elektricität in geringerem Abstande vom vertheilenden Körper befindet, und deshalb liegt die neutrale Schicht näher an der Seite, wo sich dieser Körper befindet. Leitet man den Conductor zur Erde ab, so ist es so gut, als verlängerte man ihn ins Unbegrenzte, und daher rückt auch seine neutrale Schicht in unendliche Entfernung, sodaß sich im Conductor selbst nur noch negative Elektricität befindet: durch Vertheilung hat man also mittels eines positiven Körpers den Conductor negativ elektrisch gemacht. Nähert man dagegen den positiv elektrischen Körper C (Fig. 358) einem elektrischen Pendel mit isolirendem Faden, so sammelt sich auf der Kugel die negative Elektricität an der Seite a, die dem Körper zugewendet ist, die positive aber an der abgewendeten Seite b. Da nun auch hier der Abstand zwischen a und C geringer ist, als der zwischen b und C, so überwiegt die Anziehung, und das Pendel bewegt sich nach dem Körper C hin. Sobald nun die Kugel den Körper berührt, gleicht sich ihre negative Elektricität mit einem Theile der positiven Elektricität aus, sodaß in ihr nur noch positive Elektricität verbleibt, und sie nunmehr abgestoßen wird. In diesem Falle ist also dem isolirten Leiter durch die positive Quelle auch positive Elektricität zugeführt worden; im Grunde ist der Vorgang eigentlich ebenfalls nur eine Vertheilung, die aber bis zu einem gewissen Ende geführt worden ist: mit Beibehaltung der früheren Vorstellungen bezeichnet man ihn auch jetzt wohl noch als Mittheilung der Elektricität. Ist die Kugel an einem nicht isolirenden Faden befestigt, so wird die positive Elektricität b durch denselben abgeleitet,

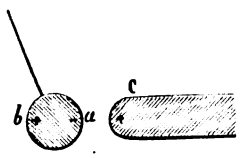


Fig. 358. Grund für die Anziehung des elektrischen Pendels.

Digitized by Google

folglich wird die Kugel nicht mehr abgestoßen, sondern von der Elektricitäts-quelle angezogen, solange dieselbe noch elektrisch ist.

§ 2. Elektroskope und Elektrometer.

Jeden Apparat, welcher dazu bestimmt ist, das Vorhandensein freier Elektricität auf einem Körper anzuzeigen, belegt man mit dem Namen eines Elektroskopes: ist er aber so sorgfältig gearbeitet, daß man mit ihm Messungen über die Spannung der Elektricität vornehmen kann, so nennt man ihn ein Elektrometer. So ist z. B. das elektrische Pendel ein Elektroskop, die Coulomb'sche Drehwage dagegen ein Elektrometer. Wir wollen jetzt noch einige der wichtigeren Elektrometer kennen lernen, und beginnen mit dem Quadranten-Elektrometer, welches in Fig. 359 dargestellt ist. Dasselbe besteht aus einer, die Elektricität leitenden Säule, welche auf dem Conductor aufrecht errichtet wird: an dieser Säule befindet sich in aufrechter Stellung ein getheilter Viertelkreis, oder auch ein Halbkreis, aus Elfenbein, von dessen Mittelpunkte ein beweglicher dünner Stab herabhängt, an dessen Ende sich eine Kugel aus Hollundermark befindet. Ist der Conductor nicht elektrisch, so liegt die Kugel an der Säule an: sobald sich aber Elektricität über den Conductor ausbreitet, so wird die Kugel abgestoßen, und entfernt sich um so weiter, je stärker die elektrische Spannung wird. Die Größe des Winkels, den das Stäbchen mit der Säule bildet, und den man am Theilkreise ablesen kann, giebt ein Maß für die elektrische Spannung.

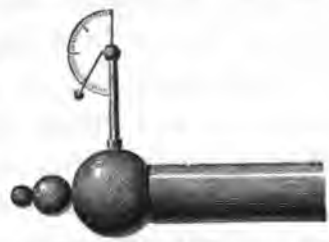


Fig. 359. Quadranten-Elektrometer.

Fig. 360. Goldblatt-Elektrometer.

Ein anderer wichtiger Meßapparat, das Goldblatt-Elektrometer (Fig. 360), besteht aus einer Glasglocke, welche auf eine Metallplatte aufgesetzt wird, und in deren Inneres ein Stäbchen aus Messing hinein-

Digitized by Google

reicht, das an seinem oberen Ende eine Kugel aus demselben Metalle trägt. Am unteren Ende des Stäbchens hängen zwei schmale Streifen aus Blattgold in der Glasglocke, welche sich berühren, solange sich auf ihnen keine Elektricität vorfindet. Will man mit diesem Apparate prüfen, ob ein Gegenstand elektrisch ist, so nähert man letzteren vorsichtig der Kugel: sieht man, daß dabei die Goldblättchen sich von einander entfernen, so ist man sicher, daß man einen elektrischen Körper genähert hat, welcher in dem Messingstäbchen und den Goldblättchen eine Vertheilung bewirkt. Um weiter zu erfahren, mit welcher Elektricität der Körper geladen ist, verfährt man am besten folgendermaßen: man berührt mit dem Finger die Messingkugel, während sich der elektrische Körper noch in der Nähe befindet, so wird dadurch die gleichnamige Elektricität, mit welcher die Goldblättchen divergirten, fortgeleitet, da dieselbe vom elektrischen Körper abgestoßen wird, und die Goldblättchen fallen zusammen. Die ungleichnamige Elektricität dagegen, welche durch den elektrischen Körper in die Kugel hinaufgezogen wurde, läßt sich nicht ableiten, da sie von dem Körper angezogen oder gebunden wird. Entfernt man nun den Finger und darauf den elektrischen Körper, so bleibt der Apparat mit der ungleichnamigen Elektricität geladen, welche sich wieder überall hin verbreitet und bewirkt, daß die Goldblättchen von Neuem divergiren. Nähert man nun dem Knopfe einen Körper, von welchem man weiß, mit welcher Elektricität er geladen ist, so kann man daraus, ob sich bei dieser Annäherung die Goldblättchen noch weiter von einander entfernen, oder sich einander nähern, erkennen, mit welcher Elektricität sie geladen sind. Ein Beispiel wird dies deutlicher machen. Nehmen wir an, der zuerst genäherte Körper sei positiv elektrisch, so wird er in die Kugel negative Elektricität ziehen, die positive aber in die Goldblättchen treiben; leiten wir nun mit dem Finger ab, so entfernen wir die positive Elektrictät, sodaß also nach Entfernung des Körpers die Blättchen mit negativer Elektricität divergiren. Nähern wir jetzt von oben eine Glasstange, so zieht dieselbe die negative Elektricität wieder in die Kugel hinauf, sodaß die Blättchen nun wieder zusammenfallen müssen: hätten wir dagegen eine Harzstange genähert, so würde durch sie noch mehr negative Elektricität in die Blättchen gedrängt werden, wodurch deren Divergenz sich noch vergrößert. Aus diesen letzten Beobachtungen kann man daher zurückschließen, daß der zuerst genäherte Körper positiv elektrisch ist: hätte

Digitized by Google

sich die letzte Beobachtung umgekehrt, so würde man wissen, daß der Körper negativ elektrisch war.

Um den Apparat noch etwas empfindlicher zu machen, stellt man zu beiden Seiten der Goldblättchen in einiger Entfernung von ihnen unter der Glasglocke Messingkugeln auf, welche zur Erde abgeleitet sind: werden nun die Goldblättchen elektrisch, so erregen sie durch Vertheilung in den Kugeln die entgegengesetzte Elektricität, durch welche sie selbst wieder angezogen werden, und hierdurch wird ihr Ausschlagswinkel vergrößert. Nähert man die zu prüfenden Gegenstände immer bis auf dieselbe Entfernung, so kann man aus der Größe des Ausschlagswinkels die Stärke ihrer Elektricität messen.

§ 3. Die Elektrisirmaschinen.

Wir haben verschiedene Mittel kennen gelernt, um in einem Körper Elektricität hervorzurufen: nunmehr wollen wir sehen, in welcher Weise diese Mittel angewendet werden können, um eine Steigerung der Elektricität bis zu einem höheren Grade zu bewirken. Die Vorrichtungen, durch welche Elektricität in größeren Massen entwickelt wird, bezeichnet man als *Elektrisirmaschinen*, als deren Erfinder wir auch wieder denselben Otto von Guericke nennen müssen, dem wir schon die Luftpumpe verdanken. Die Maschine, welche dieser berühmte Physiker construirte, bestand in der Hauptsache aus einer Schwefelkugel, die ziemlich schnell um eine Axe gedreht werden konnte, und in welcher Elektricität dadurch erzeugt wurde, daß man sie während der Drehung gegen die Handfläche schleifen ließ. Die durch die Reibung erregte Elektricität wurde auf einem Metallcylinder gesammelt, welcher an seidenen Schnuren hing, und von dessen einem Ende eine Kette bis auf die Schwefelkugel herabreichte. Durch die Elektricität der Schwefelkugel erfolgte eine Vertheilung in dem Metallcylinder oder Conductor, und die Elektricität, welche mit der auf der Schwefelkugel vorhandenen nicht gleichnamig war, glich sich mit der letzteren aus, sodaß nur die gleichnamige Elektricität im Conductor verblieb und sich durch fortgesetzte Drehung der Schwefelkugel bis zu einem gewissen Grade steigerte. Die Abbildung einer derartigen Elektrisirmaschine, wie man sie in der Mitte des achtzehnten Jahrhunderts bauete, in der Zeit,

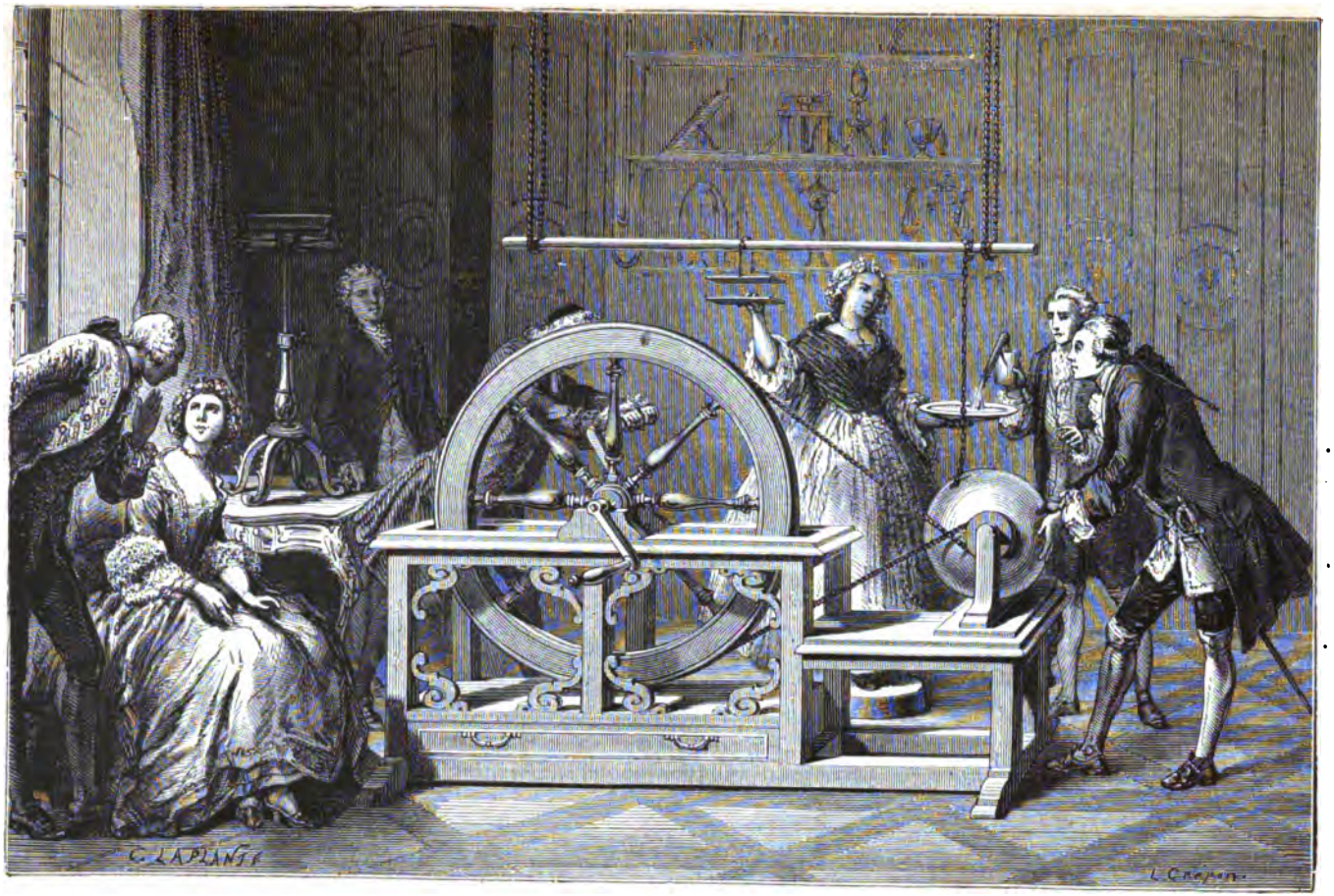
Digitized by Google

als der Abbé Nollet der vornehmen Welt eine Menge unterhaltender und merkwürdiger Versuche vorführte, theilen wir auf Tafel XIV mit.

Auf demselben Principe, welches Otto von Guericke bei seiner Maschine anwendete, beruhen auch noch die gewöhnlichen Elektrisirmaschinen unserer Tage, nur daß man sowohl den einzelnen Theilen eine bequemere Gestalt giebt, als auch manche Materialien durch andere ersetzt, welche mit mehr Vortheil angewendet werden können. Eine Maschine geeigneter Construction ist auf Tafel XV dargestellt, und wir wollen jetzt deren Theile genauer kennen lernen. Als Körper, auf welchem die Elektricität erregt wird, dient bei derselben eine große Glasscheibe von kreisförmiger Gestalt, welche in ihrem Mittelpunkte in senkrechter Stellung auf einer Axe befestigt ist, um welche sie durch eine Kurbel gedreht werden kann. Bei dieser Drehung schleift die Scheibe gegen zwei Kissen, die an den Trägern der Axe befestigt sind und durch Federn von beiden Seiten an die Scheibe angedrückt werden, und wird durch Reibung auf beiden Seiten positiv elektrisch, während die Kissen selbst negativ elektrisch werden. Diese negative Elektricität der Kissen läßt man durch einen Leiter nach der Erde abfließen; denn wenn sie sich auf den Kissen ansammeln könnte, so würde sie bald eine solche Stärke erlangen, daß die positive Elektricität der Glasscheibe durch sie vernichtet würde, und dadurch die weitere Entwickelung der Elektricität eine Grenze erreichte. Die Kissen sind mit Roßhaaren ausgestopft, ihre Umhüllung aber besteht aus Leder, auf welches eine Mischung aus Zinn, Zink und Quecksilber, sogenanntes Amalgam, mittels etwas Fett aufgetragen wird; denn man hat erkannt, daß das Glas am stärksten elektrisch wird, wenn es sich gegen solches Amalgam reibt.

Um nun die Elektricität weiter zu leiten und aufzuspeichern, befinden sich zwei Conductoren, d. h. zwei Messingcylinder, deren Enden durch Halbkugeln geschlossen sind und welche durch Glasfüße isolirt, unter sich aber durch einen dünneren Messingcylinder verbunden sind. Das Ende eines jeden dieser Cylinder, welches der Scheibe zunächst liegt, trägt einen Arm, welcher sich um die Scheibe herumlegt und Spitzen besitzt, die bis dicht an das Glas heranreichen, ohne dasselbe jedoch zu berühren. Diese Spitzen bilden den sogenannten Auffauger oder Kamm. Wird nun die Scheibe gedreht, so bewirkt sie in den Conductoren eine Vertheilung der Elektricität, indem sie die positive Elektricität abstößt, die

Digitized by Google

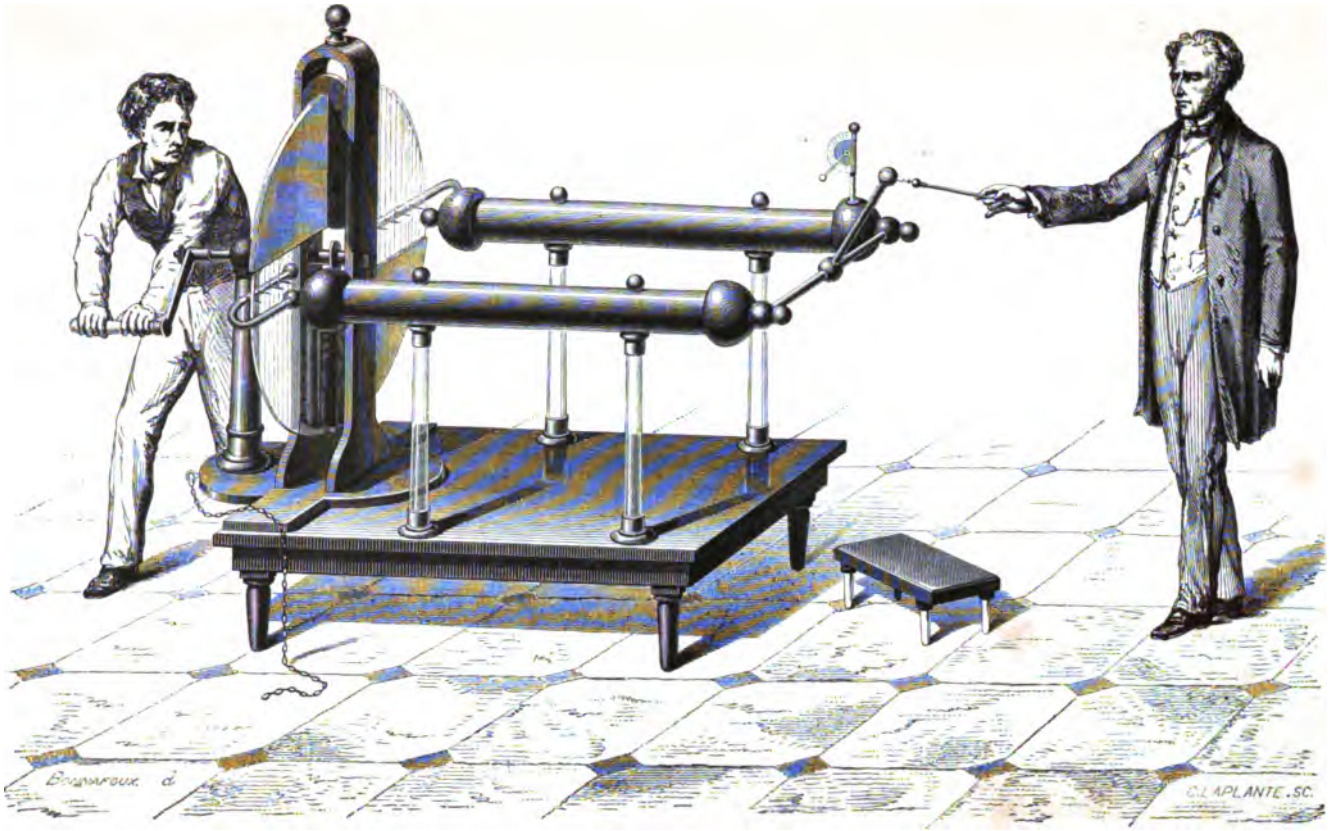


Elektriſirmaſchine nach Otto von Gueriche.

Digitized by Google

LIBRARY
OF THE
UNIVERSITY
OF
CALIFORNIA

Digitized by Google



Scheiben-Elektrisirmaschine.

Digitized by Google

THE
VERSITY
OF
CALIFORN

Digitized by Google

negative aber anzieht. Die letztere sammelt sich nicht allein in den Spitzen, sondern strömt sogar aus ihnen auf die Glasscheibe, wo sie sich mit der positiven Elektricität derselben ausgleicht. Daher sind diejenigen Theile der Scheibe, welche an den Spitzen vorübergegangen sind, unelektrisch, und erlangen erst wieder Elektricität, wenn sie durch das nächste Reibzeug hindurchgegangen sind. Um zu verhindern, daß sich die Elektricität auf ihrem Wege vom Reibzeuge bis zu den nächsten Spitzen in die Luft verliert, bringt man noch Stücke aus Wachstaffet an, welche sich fest an sie anlegen. Wird die Maschine gedreht, so sammelt sich die von der Glastafel abgestoßene positive Elektricität in den Conductoren,

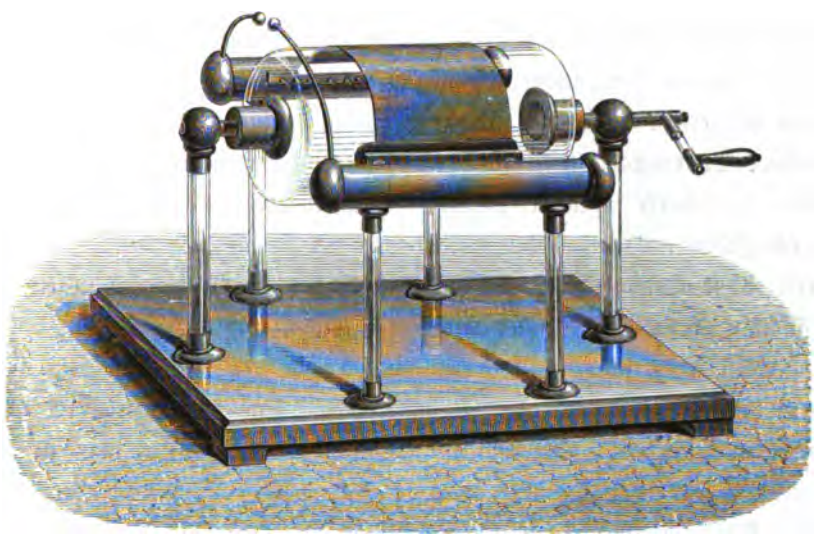


Fig. 361. Elektrisirmaschine nach Nairne, welche beide Arten Elektricitäten liefert.

und man kann die Spannung derselben leicht durch ein aufgesetztes Quadranten-Elektrometer messen. Nähert man den Conductoren einen Leiter, der mit der Erde in Verbindung steht, so findet der Ausgleich der Elektricität in Form eines sehr starken Funken statt: sobald dieser Schlag erfolgt ist, fällt die Kugel des Elektrometers an die Säule herab und steigt dann erst wieder, wenn die Spannung von Neuem gestiegen ist. Diese Maschine wirkt um so kräftiger, je trockener die Luft ist; und auch um den Conductor gut zu isoliren, müssen die Glassäulen, die ihn tragen, sorgfältig abgetrocknet und ein wenig erwärmt werden, damit sich nicht alsbald neue Feuchtigkeit auf ihnen sammelt. An Stelle

Digitized by Google

der Glasscheiben wendet man auch häufig Glascylinder an, welche aber nicht eine so hohe Spannung der Elektricität geben; der Gebrauch der Scheiben wurde zuerst durch Ramsden im vorigen Jahrhundert vorgeschlagen: seit jener Zeit aber hat die Maschine mancherlei Verbesserungen erfahren.

Beide Arten von Elektricität lassen sich auf besonderen Conductoren bei der von Nairne erfundenen Maschine (Fig. 361) sammeln: bei derselben wird ein Glascylinder gegen ein Kissen gerieben, welches an einem isolirten Conductor befestigt ist. Auf der entgegengesetzten Seite befindet sich ein zweiter isolirter Conductor, von welchem Spitzen bis in die Nähe des Glascylinders zum Auffangen der Elektricität heranreichen; bis in die Nähe dieses zweiten Conductors umschließt auch wieder ein Stück Wachstaffet, das an dem ersten Conductor befestigt ist, den Cylinder. Leitet man den ersten Conductor zur Erde ab, so sammelt sich auf dem zweiten positive Elektricität; leitet man dagegen den zweiten ab, so erhält der erste eine starke negative Ladung. Nähert man zwei Kugeln, welche durch Stäbe mit den beiden Conductoren in Verbindung stehen, während beide Conductoren isolirt sind, so findet zwischen diesen Kugeln ein beständiger Ausgleich der Elektricitäten statt.

Man hatte schon früher bemerkt, daß Elektricität entwickelt wird, wenn sich Flüssigkeiten oder Dämpfe gegen feste Körper reiben: schon wenn man ein Barometerrohr im Dunkeln neigt, so sieht man in dem oberen Theile desselben ein mattes Licht aufblitzen, welches die Folge einer kleinen elektrischen Entladung ist. Filtrirt man Quecksilber durch Fließpapier und sammelt man dasselbe in einer Porzellanschale, so erhält man, wenn man demselben den Finger nähert, einen elektrischen Funken. Auch wenn Dampf aus einer Oeffnung ausströmt, hatte man bemerkt, daß derselbe elektrisch wurde. Diese Elektricität zu steigern, ist aber erst nach vielen Versuchen dem englischen Physiker Armstrong gelungen, welcher eine Maschine erbaute, die sehr kräftige elektrische Wirkungen gab (Fig. 362). Diese Maschine besteht aus einem auf Glasfüßen isolirten Dampfkessel, in welchem aus destillirten Wasser Dampf von hoher Spannung entwickelt wird, der in die Luft durch eine Reihe von Hähnen ausströmt, nachdem er beim Durchgange durch ein Gefäß, das mit feuchtem Werg gefüllt ist, etwas abgekühlt und dadurch zum Theil condensirt ist. Die durch die Condensation gebildeten Wasser-

Digitized by Google

tropfen reiben sich sehr stark gegen eine Platte aus Buchholz, um welches sie herumgehen müssen, ehe sie aus den Röhren ausströmen können, und ebenso gegen die Wände der Röhren, welche aus demselben Stoffe bestehen, und werden dadurch um so stärker elektrisch, je höher die Spannung des Dampfes ist. Sobald das Ausströmen des Dampfes beginnt, zeigt sich der Dampfkessel negativ, der ausströmende Dampf aber positiv elek-

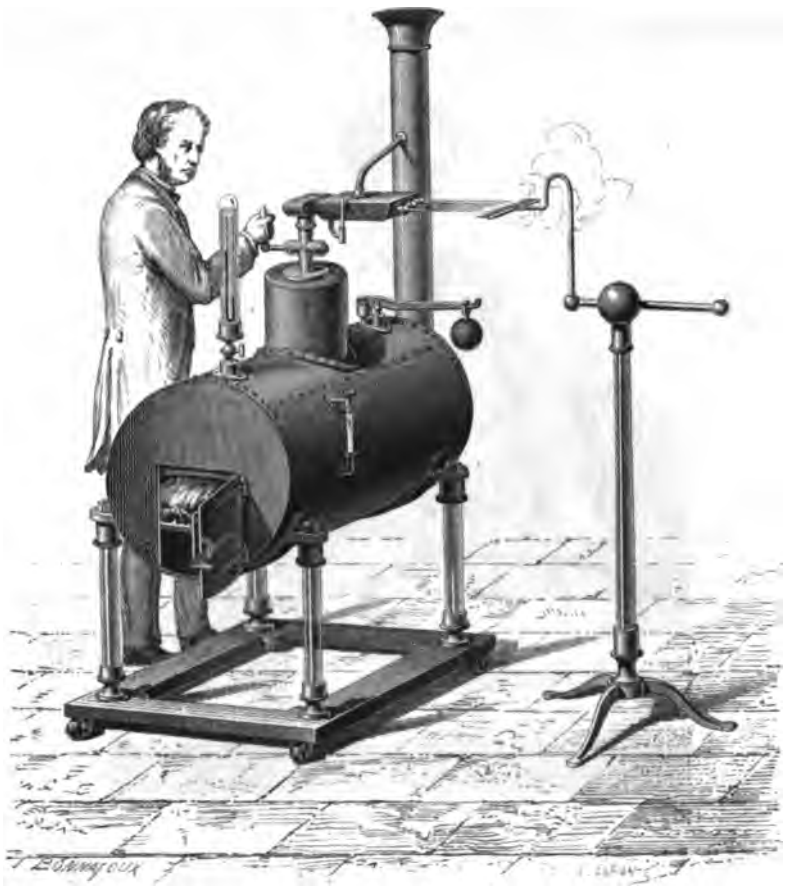


Fig. 362. Dampf-Elektrisirmaschine nach Armstrong.

trisch, und man kann die Elektricität des letzteren dadurch sammeln, daß man ihn gegen einen Conductor strömen läßt, der eine Reihe von Spitzen ihm zuwendet. So stark auch die Elektricität ist, welche eine solche Dampf-Elektrisirmaschine entwickelt, so ist dieser Apparat doch zu unbequem zu handhaben, als daß er eine große Verbreitung finden könnte: das polytechnische Institut zu London besitzt einen derartigen Apparat

Digitized by Google

mit 46 Ausflußöffnungen für den Dampf, durch welchen Funken von 22 Zoll Länge erzeugt werden können.

Weiter erwähnen wir einen für die Theorie der Elektricität sehr wichtigen Apparat, den von Volta im Jahre 1775 erfundenen Elektrophor (Fig. 363). Derselbe besteht aus einer flachen Scheibe aus Harz, z. B. aus Schellack und Wachs, welche in einem Blechrande liegt und durch Peitschen mit einem Fuchsschwanze oder Reiben mit einem Katzenfelle negativ elektrisch gemacht wird. Auf diesen Harzkuchen deckt

Fig. 363. Der Elektrophor.

man eine Metallscheibe mit abgerundeten Rändern, die durch einen isolirenden Handgriff aufgehoben werden kann. Bei der Annäherung der Metallscheibe erfolgt in derselben eine Vertheilung der Elektricität, indem die positive vom Harzkuchen angezogen, die negative abgestoßen wird: berührt man daher die Scheibe, so leitet man die negative Elektricität ab, und hebt man nun den Deckel am isolirenden Handgriffe auf, so findet man ihn so stark positiv elektrisch, daß man einen ziemlich langen Funken aus ihm ziehen kann. Daraus, daß sich die positive Elektricität

Digitized by Google

des Deckels nicht mit der negativen des Harzkuchen ausgleicht, ist wohl zu schließen, daß hauptsächlich die tieferliegenden Schichten desselben wirksam sind. Daher wird auch durch das Abheben des Deckels dem Harzkuchen nur wenig Elektricität entzogen, sodaß, wenn man den Deckel wieder aufsetzt und ableitet, man immer wieder neue Mengen von Elektricität erhält, ehe es nöthig wird, den Harzkuchen durch wiederholtes Reiben oder Peitschen von Neuem elektrisch zu machen; und selbst nach längeren Zwischenräumen findet man den Elektrophor noch geladen, wenn

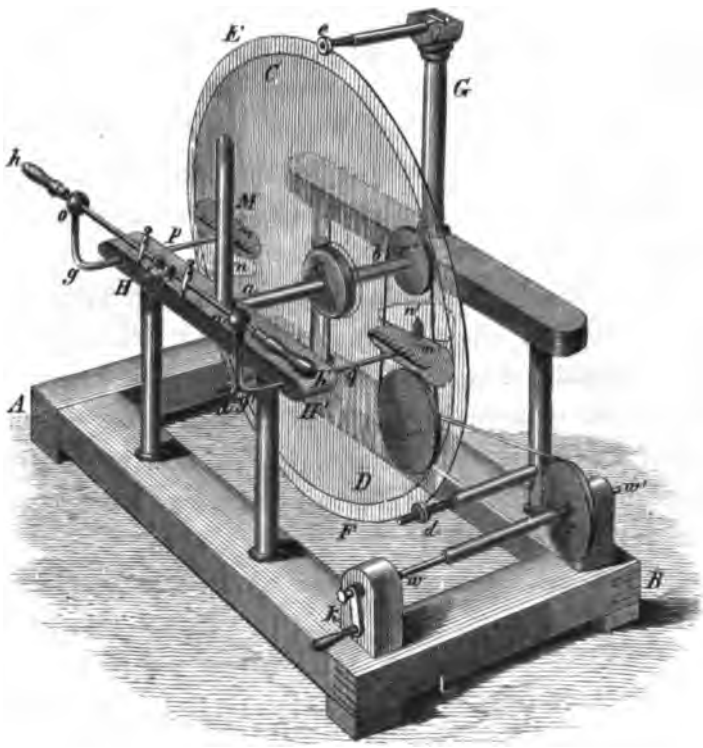


Fig. 364. Influenzmaschine von Holtz.

man nur den Deckel in der Zwischenzeit auf ihm liegen läßt, damit sich die Elektricität nicht in der Luft zerstreut.

Wir können uns nicht versagen, hier zum Schlusse die Beschreibung einer Maschine folgen zu lassen, welche nur dadurch, daß in ihr die Elektricität immer wieder auf's Neue vertheilt wird und aus Spitzen ausströmt, die überraschendsten Wirkungen giebt: wir meinen die Influenzmaschine von Holtz (Fig. 364). Auf einem festen Gestell befindet sich eine Axe a b, an welcher eine gefirnißte Glasscheibe C D befestigt

Digitized by Google

ist, die zugleich mit der Axe durch die Kurbel k und die Schnurläufe, welche durch die Rollen r, r' und r'' übertragen werden, in schnelle Umdrehung versetzt werden kann. Hinter dieser beweglichen Scheibe befindet sich eine etwas größere, feststehende Scheibe E F, welche in der Mitte durchbohrt ist, sodaß die Axe a b frei durch sie hindurch gehen kann. Außerdem sind in diese Scheibe noch zwei längliche Oeffnungen n und n' eingeschnitten, neben welchen zwei Papierstreifen m und m' auf der Außenseite befestigt sind, von denen in Spitzen auslaufende Streifen in die Oeffnungen n und n' hineinreichen. Dem Streifen m und m' gegenüber befinden sich zwei Messingkämme, welche an den gut isolirten Stäben p und q befestigt sind und durch diese mit den beiden Kugeln i und i' in Verbindung stehen. Mittels isolirender Handhaben aus Hartgummi (Ebonit) lassen sich diese beiden Kugeln von einander entfernen. Will man die Maschine in Gang setzen, so bringt man zunächst die Kugeln i und i' in Berührung, hält dann eine kleine Tafel aus Hartgummi, die man durch Reiben mit Pelzwerk negativ elektrisch gemacht hat, bei m hinter die feststehende Glasscheibe und beginnt die bewegliche Scheibe zu drehen. Entfernt man nun während des Drehens die Gummitafel und bringt man die beiden Kugeln i und i' in einige Entfernung von einander, so sieht man zwischen ihnen die Elektricität in einem beständigen Strome übergehen, der so lange anhält, als man mit Drehen fortfährt.

Fragt man nun, in welcher Weise die Elektricitätsentwickelung erfolgt, so gelangt man zu diesem Resultate. Sobald man die negative Gummitafel bei m nähert, wird in der Leitung p q die Elektricität in der Weise vertheilt, daß die positive Elektricität in die Spitzen des Kammes bei m gezogen, die negative dagegen in die des Kammes bei m' gedrängt wird. Da nun Spitzen der Elektricität einen leichten Uebergang verschaffen, so wird bei m die positive, bei m' die negative Elektricität auf die bewegliche Glasscheibe überfließen. Kommt nun der Theil der Scheibe, welcher bei m positive Elektricität aufgenommen hat, in die Nähe der Oeffnung n' der feststehenden Scheibe, so bindet er in der Spitze des Beleges m' negative Elektricität, und die positive Elektricität der drehbaren Scheibe gleicht sich mit der negativen der Spitze aus, weil Glas ein, wenn auch schlechter, Leiter der Elektricität ist. Dagegen hat dieselbe positive Elektricität die positive Elektricität des Beleges m'

Digitized by Google

abgestoßen, sodaß das letztere eine positive Ladung behält und aus dem ihm gegenüberstehenden Kamme wieder neue negative Elektricität auf die Glasscheibe herüberzieht. Genau dieselben Erscheinungen gehen auch bei dem Belege m vor sich, nur daß immer die andere Elektricität zu setzen ist. Auf diese Weise bleibt während der Drehung das Beleg m immer negativ, m' immer positiv, sodaß man sehr bald die Gummitafel, welche zuerst die Vertheilung bewirkt (influenzirt) hatte, entbehren kann und die Elektricität zwischen i und i' in beständigem Strome übergeht.

Will man an Stelle dieses Stromes einzelne kräftige Funken ziehen, so muß man noch eine Vorrichtung anbringen, welche man den Condensator (Fig. 365) nennt. Derselbe besteht aus einer Glasröhre a b, welche im Innern mit Stanniol belegt oder auch auf chemischem Wege mit einem Silberüberzug versehen ist. Aeußerlich befinden sich auf ihr zwei Holzfassungen e und f, welche sich mit zwei Oeffnungen c und d

Fig. 365. Condensator der Holtz'schen Maschine.

auf den Armen p und q der Maschine befestigen lassen. Diese Oeffnungen sind mit Stanniol ausgeklebt, welches mit kurzen äußeren Belegen m m' und n n' in Verbindung steht. Wird dieser Condensator aufgelegt, so werden die Elektricitäten nicht sogleich überströmen, sondern sich in e und f, wie in Leydener Flaschen, sammeln und erst dann die Luft in Form von langen, gezackten Blitzen durchbrechen, wenn die Spannung stark genug geworden ist.

Auch Leydener Flaschen und Batterien kann man mit der Holtz'schen Maschine laden, wenn man die Kugeln i und i' von einander entfernt und dann die eine mit dem äußeren, die andere mit dem inneren Belege in Verbindung setzt. Abgesehen von dem Interesse, das die Holtz'sche Maschine gewährt, hat sie auch noch den Vortheil, daß sie von den Einflüssen der Witterung viel unabhängiger ist, als die gewöhnliche Elektrisirmaschine.

Digitized by Google

§. 4. Verschiedene elektrische Versuche.

Wir wollen uns jetzt zu der Beschreibung einiger einfacher Versuche wenden, welche mit der Elektrisirmaschine ausgeführt werden können, und beginnen mit dem elektrischen Glockenspiele (Fig. 366). An einem metallenen Lineale, welches an dem Conductor der Elektrisirmaschine befestigt ist und mit ihm in leitender Verbindung steht, hängen zwei Glocken an Ketten, zwischen denen noch eine dritte Glocke an einem Seidenfaden aufgehängt und zur Erde abgeleitet ist. Zwischen je zwei Glocken hängen ebenfalls an Seidenfäden Metallkugeln, welche, sobald der Conductor elektrisch wird, von den Glocken, die mit dem Conductor in Verbindung stehen, angezogen werden und sich mit positiver Elektricität laden, sobald sie an die Glocken anschlagen. Die Folge ist, daß sie nunmehr von diesen Glocken abgestoßen, von der dritten Glocke aber, welche durch Vertheilung negativ elektrisch ist, angezogen werden, bis sie an dieselbe anschlagen und ihre Elektricität an sie abgeben, worauf das Spiel von Neuem beginnt.

Fig. 366. Elektrisches Glockenspiel.

Fig. 367. Elektrischer Hagel.

Um die Bewegung der Hagelkörner bei einem Hagelwetter anschaulich zu machen, ersann Volta den folgenden Apparat: durch eine Oeffnung im oberen Theile einer Glasglocke reicht in das Innere ein Metallstab, der mit dem Conductor einer Elektrisirmaschine in Berührung steht, dessen unteres Ende aber eine Metallscheibe trägt, welche sich in einiger Höhe über einem Metallteller befindet, auf dem die Glasglocke steht

Digitized by Google

und auf welchem eine Anzahl Kugeln aus Hollundermark liegen. Sobald die Elektrisirmaschine gedreht wird, so bewegen sich diese Kugeln sehr lebhaft zwischen dem Teller und der Metallscheibe hin und her und bilden den sogenannten elektrischen Hagel (Fig. 367). Richtet man es so ein, daß sich die Luft aus der Glasglocke auspumpen läßt, so hört das Spiel der Kugeln auf, sobald die Luft stark verdünnt ist, weil die Elektricität durch einen luftverdünnten Raum mit Leichtigkeit hindurchfließt.

Wir haben früher erwähnt, daß, wenn man den Finger einer geriebenen Glasstange nähert, ein kleiner Funke von ihr überspringt, daß sie aber nur an der dem Finger nächst liegenden Stelle ihre Elektricität einbüßt. Nähert man dagegen den Finger dem Conductor einer Elektrisirmaschine, so ist der überspringende Funken sehr stark und für uns sehr empfindlich; durch ihn büßt aber der Conductor alle Elektricität ein, die nun erst durch weiteres Drehen der Elektrisirmaschine ersetzt wird. Nähert man den Finger auf nur geringe Entfernung, so folgen die Entladungen sehr schnell aufeinander, jede einzelne ist aber nicht sehr stark: je weiter man den Finger entfernt, desto seltener, aber auch desto stärker werden die Schläge, bis endlich der Zwischenraum zu groß wird, als daß er von der Elektricität des Conductors durchbrochen werden könnte. Stellt sich eine Person auf eine Holzplatte, die auf Glasfüßen ruht, einen sogenannten Isolirschemel, und legt dieselbe ihre Hand auf den Conductor, so wird sie selbst elektrisch, indem sie gewissermaßen einen Theil des Conductors bildet: nähert man sich ihr, so erhält man von ihr elektrische Schläge, welche sie selbst aber in gleichem Maße empfindet; zugleich auch sträuben sich ihre Haare, und wird der Versuch im Finstern ausgeführt, so sieht man an allen spitzen Gegenständen, welche sie trägt, kleine Lichtbüschel.

Fig. 368. Blitzröhre.

Klebt man auf Glas kleine Stückchen Stanniol so auf, daß dieselben eine Reihe bilden, daß aber immer zwischen je zwei aufeinander folgenden ein kleiner Zwischenraum bleibt, und läßt man durch die ganze Reihe die Elektricität des Conductors hindurch gehen, so überspringt

Digitized by Google

dieſelbe jeden dieſer Zwiſchenräume in Form eines Funken. Durch geeignete Anordnung iſt es möglich, auf einer Glastafel die Unterbrechungsſtellen ſo zu vertheilen, daß die Funken ſich zu einem Bilde zuſammenſetzen, wie aus Fig. 370 zu ſehen iſt, während bei Fig. 368 und 369 die Stanniolſtückchen auf einer Röhre oder Kugel gleichmäßig vertheilt ſind, ſodaß die Funken den Anblick von leuchtenden Ketten gewähren.

Durchbricht die Elektricität die Luft, ſo bewirkt ſie in derſelben eine Expanſion, gleich als ob die Luft erwärmt worden wäre, wie man mittels des Thermometers von Kinnersley (Fig. 371) zeigen kann.

Fig. 369. Blitzkugel.

Fig. 370. Blitztafel.

Daſſelbe beſteht aus zwei communicirenden Glasröhren, welche bis zu einer gewiſſen Höhe mit Waſſer gefüllt ſind: in die weitere Röhre reicht ein Meſſingdraht mit Kugel von unten her bis über den Waſſerſpiegel, oberhalb wird aber ein Deckel aufgeſchraubt, von dem ein Stab mit Kugel bis nahe an die andere Kugel herabreicht. Läßt man nun elektriſche Funken zwiſchen beiden Kugeln überſchlagen, ſo dehnen dieſelben die Luft aus und es wird das Waſſer in der engeren Röhre weiter hinauf gedrängt. Kinnersley glaubte, daß dieſe Ausdehnung der Luft die Folge einer Erwärmung derſelben ſei und bezeichnete daher ſeinen

Digitized by Google

Apparat als ein Thermometer: später hat man gezeigt, daß eine Erwärmung in dem Grade, wie sie durch die Ausdehnung angezeigt wird, nicht stattfindet, sondern die Elektricität wirkt selbst in gleicher Weise, wie wir es früher von der Wärme kennen gelernt haben. Läßt man

Fig. 371. Thermometer von Kinnersley.

Fig. 372. Elektrischer Mörser.

einen elektrischen Funken im Innern eines kleinen Gefäßes aus Elfenbein, dessen Mündung durch eine Kugel geschlossen ist, überspringen, so wird durch die Ausdehnung der Luft diese Kugel weit weggeschleudert; man nennt diesen kleinen Apparat einen elektrischen Mörser (Fig. 372).

§. 5. Verdichtung der Elektricität. Die Leydener Flasche.

Als Cunäus, ein berühmter Physiker in Leyden, eines Tages das Wasser elektrisiren wollte, das in einer weithalsigen Flasche enthalten war, und deshalb die Flasche mit der Hand so hielt, daß ein Metallstab, welcher am Conductor der Elektrisirmaschine hing, in das Wasser eintauchte, so erhielt er einen heftigen Schlag in dem Augenblicke, wo er den Stab vom Conductor loslösen wollte (Fig. 373). Dieser Versuch machte sehr großes Aufsehen, und die Erschütterung durch den Schlag war eine so überraschende Erscheinung, daß Muschenbroek darüber an Réaumur berichtet, daß er um alles in der Welt nicht noch einen zweiten solchen Schlag empfinden möchte und wenn man ihm die Krone Frankreichs anböte. Andere Physiker, deren Nerven weniger empfindlich

Digitized by Google

waren, wie Lemonnier, Winckler, der Abbé Nollet u. a. dagegen verfolgten die Entdeckung, welche Cunäus im Jahre 1746 gemacht hatte, weiter und verbesserten den Apparat, welchen man nach dem Orte der Erfindung als Leydener Flasche bezeichnet. Wir wollen nicht unerwähnt lassen, daß dieselbe Erfindung bereits im Jahre vorher durch Kleist in Cammin gemacht worden war, daß sie aber von dort aus sich nicht weiter verbreitete: nach diesem eigentlich ersten Erfinder bezeichnet man diesen Apparat auch häufig als Kleist'sche Flasche.

Jetzt stellt man die Leydener Flasche gewöhnlich dadurch her, daß

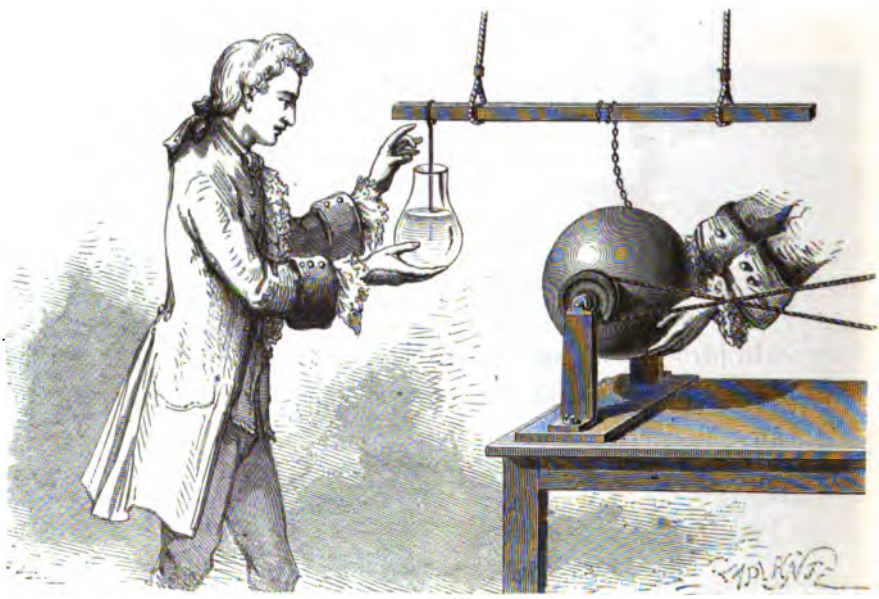


Fig. 373. Versuch von Cunäus. — Leydener Flasche.

man den Boden und die Oberfläche einer Glasflasche bis zu etwa drei Viertel ihrer Höhe mit Stanniol beklebt, das Innere derselben aber mit Rauschgold füllt. Die Flasche mit Eisenfeilspänen zu füllen, ist nicht empfehlenswerth, weil sich in den Spitzen der Späne die Elektricität leicht so stark anhäuft, daß sie das Glas zertrümmert: dagegen ist es vortheilhaft, an Stelle der Flaschen weitere Glasgefäße zu nehmen, deren innere Seite ebenso weit wie die äußere mit Stanniol beklebt wird. Der Theil des Glases, welcher sich oberhalb der Stanniolblätter, die man das äußere und innere Beleg der Flasche nennt, befindet, wird mit Schellackfirniß überstrichen, damit die Isolation zwischen beiden Be-

Digitized by Google

legen möglichst vollkommen ist; in das Innere aber wird durch den Hals der Flasche ein Messingstab gesteckt, der oben in einer Kugel endigt. Will man die Flasche laden, so bringt man die Kugel mit dem Conductor der Elektrisirmaschine in Berührung, leitet aber das äußere Beleg nach der Erde ab (Fig. 374). Dreht man die Maschine, so sammelt sich in kurzer Zeit soviel Elektricität an, daß, wenn man das äußere Beleg mit dem inneren durch einen Leiter verbindet, die Elektricität in einem starken Funken und mit einem Knalle überspringt: schaltet man den eigenen Körper ein, so empfindet man den Schlag, der die Physiker, welche zuerst dieses Experiment ausführten, so sehr erschreckte. Reichen sich eine Anzahl Personen die Hände und faßt die erste Person das äußere Beleg der Flasche an, während die letzte mit dem Finger den Knopf der Flasche berührt, so empfinden alle gleichzeitig den Schlag: in dieser Weise elektrisirte Nollet in Gegenwart Ludwigs XV. mit einem Male dreihundert Gardegrenadiere.

Fig. 374. Ladung der Leydener Flasche.

Wie es kommt, daß sich in der Leydener Flasche die Elektricität in ganz anderer Stärke anhäuft als auf dem freien Conductor, das läßt sich leichter erklären mit Hülfe eines anderen Apparates, welcher auf denselben Principien beruht, des Condensators nach Aepinus (Fig. 375). Dieser Condensator besteht aus zwei Metallplatten A und B, welche auf Glasfüßen isolirt befestigt sind und längs eines Lineales bis dicht an eine Glastafel C herangeschoben werden können. Stellt man zunächst die eine Platte in einiger Entfernung von der Glastafel auf und verbindet man sie durch eine Kette mit dem Conductor der Maschine, so wird sich auf ihr positive Elektricität sammeln, welche sich auf allen Seiten ausbreitet und eine gewisse Spannung besitzt, sodaß ein mit ihr verbundenes Quadrantenelektrometer einen bestimmten Ausschlag zeigt. Rückt man sie nun an die Glastafel heran, während man von der anderen Seite die zweite Platte nähert, die zur Erde abgeleitet ist, so

Digitized by Google

bindet die positive Elektricität der ersten Platte auf der zweiten Platte negative Elektricität, durch welche sie selbst auf die vordere Seite der Platte gezogen wird: dadurch scheint in dem übrigen Theile die Elektricität verschwunden zu sein und das Elektrometer fällt auf den Nullpunkt zurück. Die positive Elektricität, welche sich nach der Seite der Glasplatte hin angesammelt hat, wird aber durch die negative Elektricität der zweiten Platte angezogen oder gebunden, sodaß sie nach außen nicht mehr wirken kann und also auch dem Eintritte neuer Elektricität von Seiten des Conductors, wenn die Maschine weiter gedreht wird, sich nicht widersetzt (Fig. 376). Diese neue positive Elektricität zieht aber auch wieder

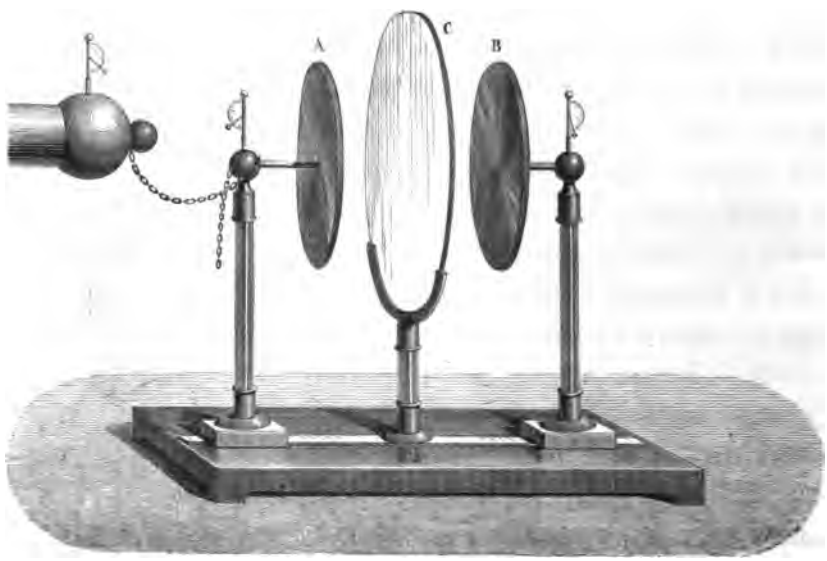


Fig. 375. Condensator nach Aepinus.

neue negative in die zweite Tafel, von welcher sie selbst wieder gebunden wird; und auf diese Weise würde sich die Verstärkung ohne Ende fortsetzen, wenn die Anziehung der beiden Elektricitäten nicht schließlich so stark würde, daß der Ausgleich durch die Glastafel hindurch gewaltsam erfolgte. Diesen Grad darf man natürlich niemals erreichen, wenn man nicht seine Apparate zertrümmern will. Bringt man nach erfolgter Ladung die beiden Metallscheiben durch einen Leiter in Verbindung, so erfolgt durch denselben ein Ausgleich der beiden Elektricitäten. Genau in derselben Weise wie beim Condensator sammelt sich die positive Elektricität auch im innern Belege der Leydener Flasche, bindet im äußeren

Digitized by Google

Belege negative und wird selbst durch diese wieder gebunden, sodaß immer neue Mengen einströmen können.

Entladet man eine Leydener Flasche, und verbindet man nach kurzer

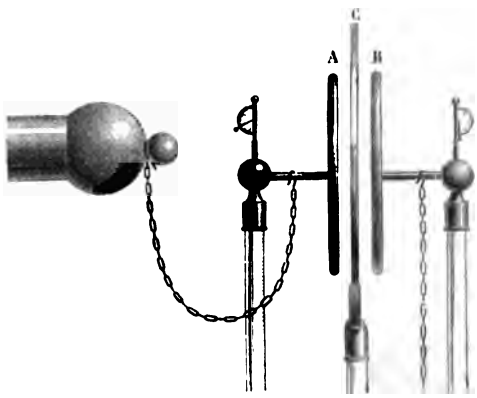


Fig. 376. Ladung des Condensators nach Aepinus.

Zeit die beiden Belege abermals, so sieht man, daß noch ein zweiter kleiner Funken überspringt: es ist also bei der ersten Entladung noch ein kleiner Rückstand oder ein Residuum in der Flasche geblieben, woraus man geschlossen hat, daß ein Theil der Elektricität in das Glas eindringt und bei der Entladung nicht sogleich wieder zurückkehrt. Um dies genauer zu untersuchen, verfertigt man Leydener Flaschen, deren Belege sich entfernen lassen: man nimmt einen Metallbecher, in welchen ein Glas mit gefirnißtem Rande paßt, und bildet das innere Beleg aus einem Pappcylinder, der mit Stanniol beklebt ist und an dem ein Messinghaken angebracht ist (Fig. 377). Setzt man diese drei Theile zusammen, so bilden sie eine Leydener Flasche, welche man auf gewöhnliche Weise ladet. Hebt man nun das innere Beleg mittels einer Glasstange heraus, so findet man dasselbe in nur geringem Grade elektrisch, und ebenso zeigt das äußere Beleg nur wenig Elektricität, wenn man das Glas aus ihm entfernt. Vereinigt man aber alle drei Theile wieder in der vorigen Weise, und verbindet man die beiden Belege, so zeigt sich wieder eine

Fig. 377. Leydener Flasche, deren Belege sich entfernen lassen.

Digitized by Google

heftige Entladung. Hieraus muß man schließen, daß die Elektricität sich nicht in den Belegen, sondern an der Oberfläche der isolirenden Glasschicht sammelt. Zu demselben Resultate kommt man auch, wenn man den Condensator nach Aepinus benutzt: und endlich wollen wir noch einen Versuch erwähnen, der in demselben Umstande seine Erklärung findet. Ladet man ein Glas Wasser in der Weise, wie es Cunäus zuerst ausführte (Fig. 373), gießt man dann das Wasser aus und füllt dafür anderes Wasser ein, welches durchaus unelektrisch ist, so erhält man doch einen starken Schlag, sobald man nunmehr mit dem Finger der einen Hand das Wasser berührt, während die andere Hand das Glas umschließt.

Fig. 378. Franklin'sche Tafel.

Von dem erwähnten Condensator unterscheidet sich in keiner Weise die sogenannte Franklin'sche Tafel (Fig. 378), nur daß an Stelle der Metallplatten Quadrate aus Stanniol auf eine Glastafel geklebt sind. Leitet man das eine Quadrat zur Erde ab, während man das andere mit dem Conductor der Maschine verbindet, so erfolgt die Ladung wie beim Condensator und der Leydener Flasche. Gewöhnlich zerschlitzt man das eine Beleg, um zu zeigen, wie sich die Elektricität beim Laden nach allen Seiten hin vertheilt, indem sie die Zwischenräume in Form von Funken überspringt, und wie sie sich ebenso beim Entladen von allen Punkten nach der Stelle hin sammelt, wo die Berührung erfolgte. Eine solche Tafel heißt Blitztafel.

Will man eine Leydener Flasche entladen, ohne doch selbst die un-

Digitized by Google

angenehme Erschütterung zu empfinden, so bedient man sich dazu am einfachsten des gewöhnlichen Ausladers (Fig. 379). Derselbe besteht aus zwei gebogenen Metallstäben mit Kugeln, welche in einem Gelenke an einander stoßen, und deren jeder mit einem Handgriffe aus Glas versehen ist. Faßt man die Griffe mit den Händen, so kann man ohne Gefahr die eine Kugel an das äußere Beleg die andere aber an den Knopf der Flasche anlegen: es erfolgt dann die Entladung durch die Metallstäbe mit einem Schlage und ohne daß wir davon getroffen werden. Will man eine Flasche allmählich entladen, so hängt man zwischen den Knopf der Flasche und einen Leiter, der mit dem äußeren Belege

Fig. 379. Entladung einer Leydener Flasche durch den gewöhnlichen Ausladen.

in Verbindung steht, einen kleinen Körper isolirt auf: derselbe wird wie ein Pendel hin und her schwingen und jedesmal etwas Elektricität von einem Punkte zum anderen übertragen. Man kann an Stelle des Knopfes der Flasche eine kleine Glocke anbringen, und eine zweite mit dem äußeren Belege in Verbindung setzen, wie in Fig. 380 dargestellt ist. Auch die Ladung der Leydener Flasche kann man anschaulich machen, wenn man die Außenseite derselben, statt sie mit Stanniol zu belegen, mit Gummi bestreicht und mit Eisenfeilspänen bestreut. Bei solch einer Flasche, welche Blitzflasche heißt (Fig. 381), biegt man gewöhnlich den Draht der aus dem Innern der Kugel kommt, so weit um, daß er bis

Digitized by Google

in die Nähe des äußeren Beleges heranreicht, oder auch, man klebt einen Streifen Stanniol vom Halse an bis nahe an das Beleg heran, damit sich die Flasche, wenn sie eine bestimmte Stärke der Ladung erlangt hat, von selbst entladet. Beim Laden sowohl, als beim Entladen, sieht man die Elektricität in Zickzacklinien über die Oberfläche hinwegfließen.

Beschreibt man mit dem Knopfe einer geladenen Leydener Flasche auf einer Platte aus Harz, wie sie z. B. beim Elektrophor zur Anwendung kommt, beliebige Figuren, und streut man hierauf sehr feines Schwefel-

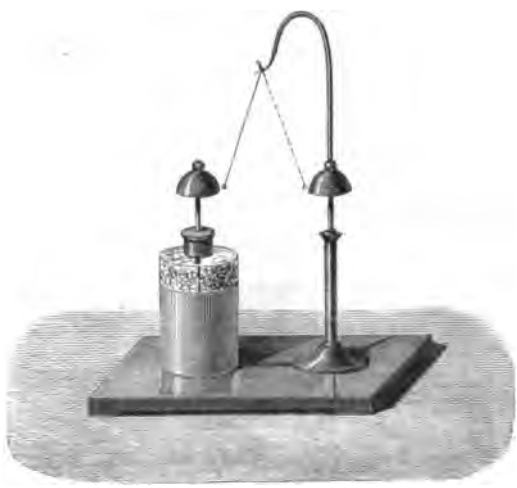


Fig. 380. Allmähliche Entladung einer Leydener Flasche.

Fig. 381. Blitzflasche.

pulver, so ordnet sich dasselbe auf den beschriebenen Linien in eigenthümlicher Weise an; dasselbe geschieht auch, wenn man die Flasche beim Knopfe ergreift, was man aber nur thun darf, wenn sie gut isolirt ist, und mit dem Rande des äußeren Beleges Figuren verzeichnet, die man mit Mennige bestreut. In Figur 382 sieht man solche Linien, welche man nach dem Erfinder mit dem Namen der Lichtenbergischen Figuren bezeichnet, und zwar stellt der innere Ring die Lagerung des Schwefels auf den mit positiver Elektricität berührten Stellen, der äußere Ring die Lagerung der Mennige auf den negativ elektrischen Stellen dar.

Digitized by Google

Aehnliche Figuren erhielt Lichtenberg, wenn er auf eine dünne Schicht aus Schellack, die auf eine Metallplatte ausgegossen war, einen elektrischen Funken aufschlagen ließ: beim Auftreffen der positiven Elektricität zeigten sich Gestalten wie in Fig. 383, beim Auftreffen eines negativen Funkens dagegen wie in Fig. 384. Man sieht, daß die positive Elektricität mehr strahlige, die negative mehr wolkige Figuren bildet.

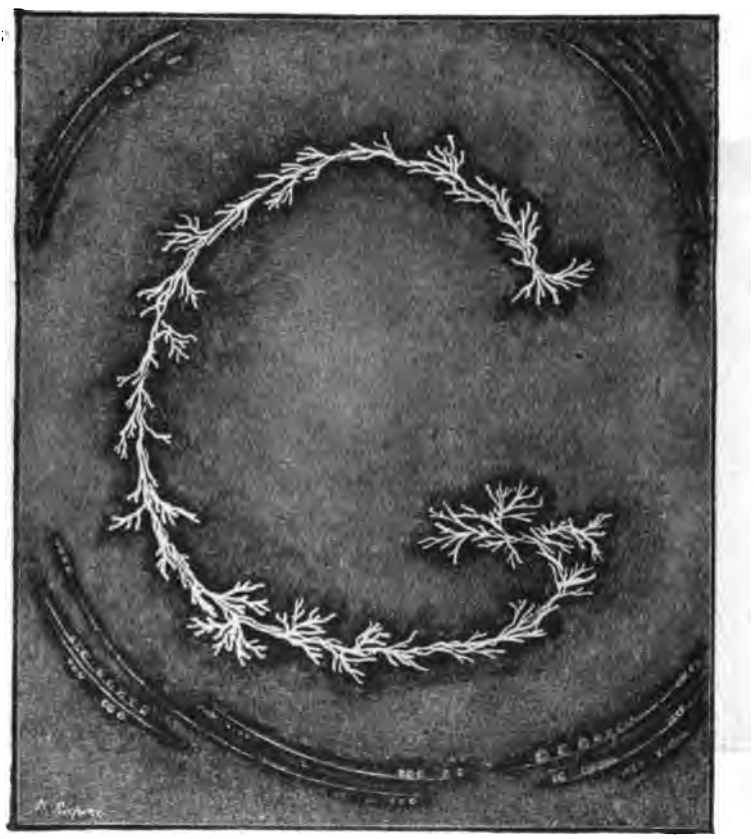


Fig. 382. Lichtenbergische Figuren. Lagerung beider Elektricitäten.

Will man sehr starke Wirkungen erzielen, so muß man der Fläche der Belege eine bedeutende Ausdehnung geben: da aber hierdurch die Handhabung der Flaschen sehr unbequem wird, so zieht man es vor, mehrere Flaschen mit einander zu vereinigen, indem man sie in einen gemeinsamen Kasten stellt, der innerlich mit Stanniol beklebt und zur Erde abgeleitet ist, und indem man ihre Kugeln mit einander verbindet. Eine solche Vereinigung von Flaschen nennt man eine elektrische

Digitized by Google

Batterie (Fig. 385). In solcher Batterie sammelt sich nach und nach eine sehr bedeutende Menge Elektricität an und man muß daher sowohl beim Laden, als auch beim Entladen, sehr vorsichtig sein, daß man ja nicht einen Schlag von derselben erhält. Schon durch die Ladung einer Batterie von sechs Flaschen von mittlerer Größe, können kleinere Thiere wie Hunde und Kaninchen getödtet werden. Die Ladung einer Batterie aus vielen Flaschen nimmt immer eine ziemliche Zeit in Anspruch; etwas schneller kommt man mit derselben zum Ziele durch die sogenannte Cascadenladung, welche in folgender Weise ausgeführt wird. Man theilt die ganze Batterie in Gruppen von je zwei bis vier Flaschen und stellt jede dieser Gruppen isolirt auf; das innere Beleg der ersten Gruppe verbindet man mit dem Conductor der Maschine, vom äußeren Belege aber führt man eine isolirte Leitung zum innern Beleg der zweiten Gruppe, sodaß diese durch die positive Elektricität geladen wird, welche vom äußeren Belege der ersten fortströmt. Ebenso verbindet man das äußere Beleg der zweiten mit dem inneren Beleg der dritten Gruppe, und so fort bis zur letzten, deren äußeres Beleg man zur Erde ableitet. Ist nun die Ladung erfolgt, so unterbricht

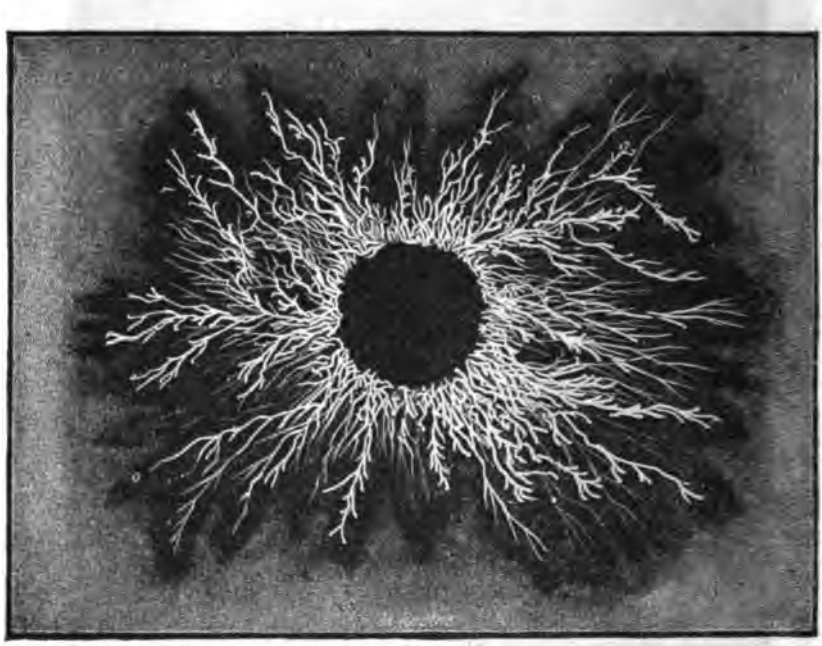


Fig. 383. Lichtenbergische Figuren. Vertheilung der positiven Elektricität.

Digitized by Google

man die Verbindungen und setzt einerseits alle inneren Belege, andererseits alle äußeren Belege unter sich in Zusammenhang. Natürlich müssen alle diese Operationen so ausgeführt werden, daß niemals eine Leitung nach der Erde oder gar nach unserem Körper hin vorhanden ist, was immer einige Schwierigkeiten hat. Der Name dieser Art von Ladung rührt daher, daß die Elektricität von einer Gruppe zur andern ebenso abfließt, wie das Wasser bei einem Wasserfalle von einer Stufe zur anderen springt; ihr Nachtheil besteht, abgesehen von der Schwie-

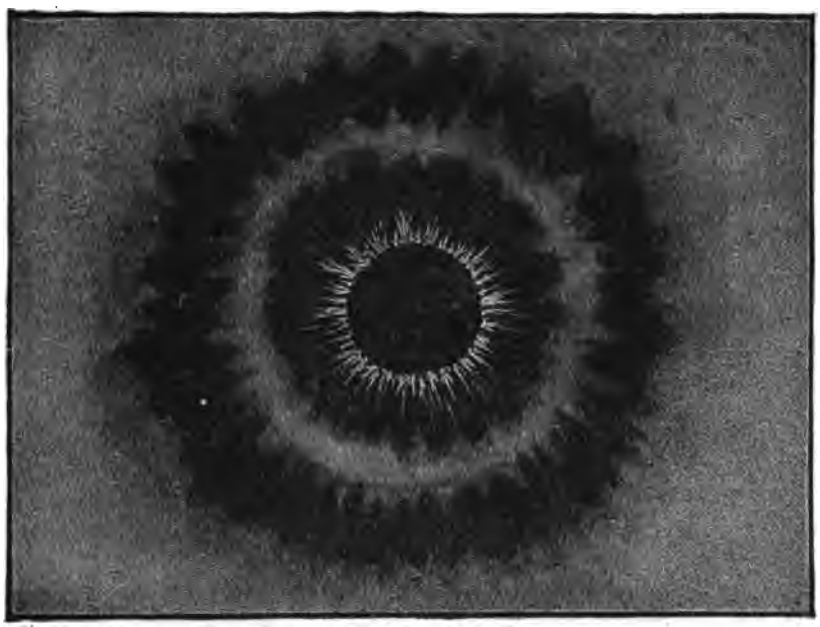


Fig. 384. Lichtenbergische Figuren. Vertheilung der negativen Elektricität.

rigkeit der Isolirung, hauptsächlich darin, daß die Ladung der einzelnen Gruppen nicht gleich stark ist, indem jede Gruppe um so schwächer geladen wird, als sie weiter von der Maschine absteht.

Will man eine Batterie oder auch nur eine Flasche entladen und dabei den Schlag durch irgend einen Körper hindurch führen, so kann man dazu den Henley'schen oder allgemeinen Auslader (Fig. 386) benutzen, welcher aus zwei Messingstäben besteht, die auf isolirenden Glassäulen so befestigt sind, daß sie sich durch Kugelgelenke beliebig stellen und durch Verschieben in Hülsen in beliebige Entfernung bringen lassen. Zwischen beiden befindet sich noch ein isolirtes Tischchen, auf

Digitized by Google

welches man die Körper legt, die den Schlag erhalten ſollen. Will man mit dieſem Ausladen Verſuche anſtellen, ſo legt man zunächſt den Gegenſtand der Unterſuchung auf das Tiſchchen und bringt mit ihm die Kugeln des Ausladers in Berührung, verbindet darauf den einen Meſſingſtab mit dem äußeren Belege der Flaſche oder Batterie durch eine Kette und berührt endlich den anderen Meſſingſtab mit dem Knopfe, der mit dem inneren Belege in Verbindung ſteht. Legt man z. B. auf das Tiſchchen ein Stück Flußſpath und berührt man daſſelbe mit den Kugeln des Ausladers, ſo ſieht man, wenn die Entladung über

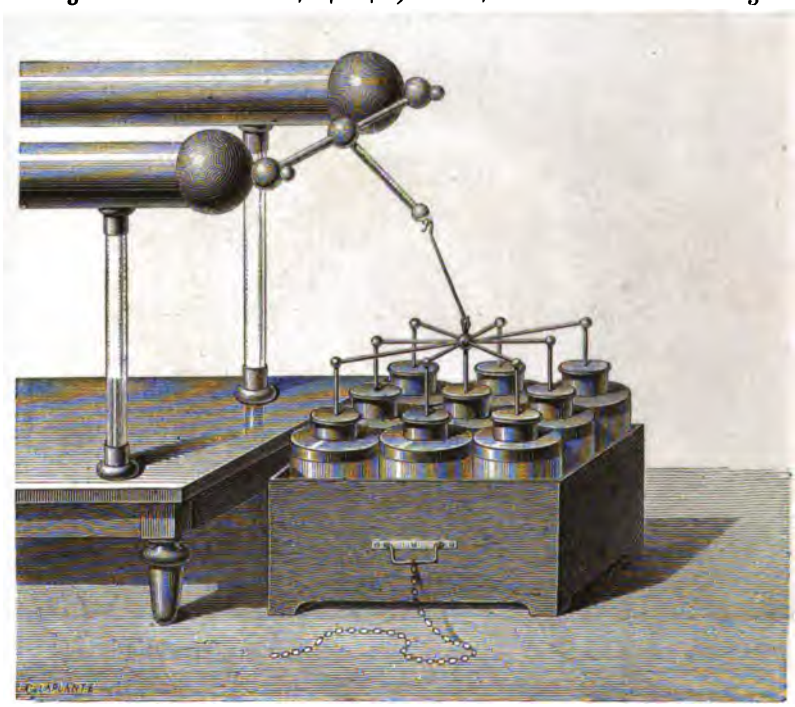


Fig. 385. Elektriſche Batterie.

die Oberfläche des Minerales hinweg gegangen iſt, daß es im Dunkeln noch lange Zeit fortleuchtet.

Wir wollen jetzt noch einige Wirkungen der Entladungsſchläge erwähnen. Bringt man zwiſchen zwei metalliſche Spitzen ein Kartenblatt, und läßt man zwiſchen jenen eine Flaſche ſich entladen, ſo findet man in der Karte eine feine Oeffnung, deren Ränder nach beiden Seiten hin aufgeworfen ſind. Die letztere Erſcheinung hat wahrſcheinlich darin ihren Grund, daß eine geringe Menge Waſſer, die ſich immer in der

Digitized by Google

Karte vorfindet, durch den elektrischen Schlag in Dampf verwandelt wird, der durch seine Explosion die Ränder aufwirft. In gleicher Weise kann man auch eine Glastafel von 1—2 Millimeter Dicke durchbohren, wenn man dieselbe horizontal zwischen zwei Metallspitzen legt, zwischen denen der Schlag einer starken elektrischen Batterie überspringt. Um zu verhindern, daß sich die Elektricität auf der Glastafel ausbreitet, bringt man auf dieselbe auf jeder Seite einen Tropfen Oel an die Stelle, wo die Spitzen sie berühren. Durch den Schlag wird in die

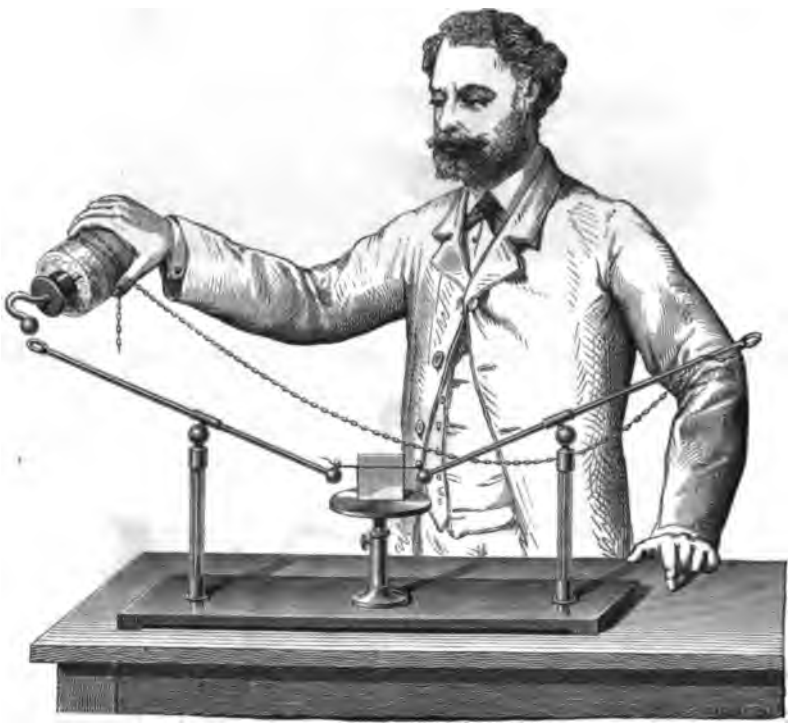


Fig. 386. Henley's Ausladet.

Tafel ein feines Loch gebohrt, die Glasmasse aber, welche dieses Loch erfüllte, in feinen Staub verwandelt (Fig. 387 und 388).

Verbindet man die beiden Kugeln des allgemeinen Ausladers durch einen sehr dünnen Metalldraht, so wird derselbe bei der Entladung glühend, ja er schmilzt und verdampft sogar, wenn der Schlag kräftig genug ist. Man hat auf diese Weise viele Metalle geschmolzen, und zwar geschieht dies bei manchen derselben leichter, als bei anderen: so läßt sich Eisen, Platin und Blei durch dieses Mittel leichter schmelzen,

Digitized by Google

als Gold, Silber und besonders Kupfer. Verbindet man die beiden Kugeln durch einen Seidenfaden, dessen Oberfläche vergoldet ist, so

Fig. 387. Durchbohrung einer Karte.

schmilzt das Gold, der Seidenfaden aber bleibt unverändet; man kann

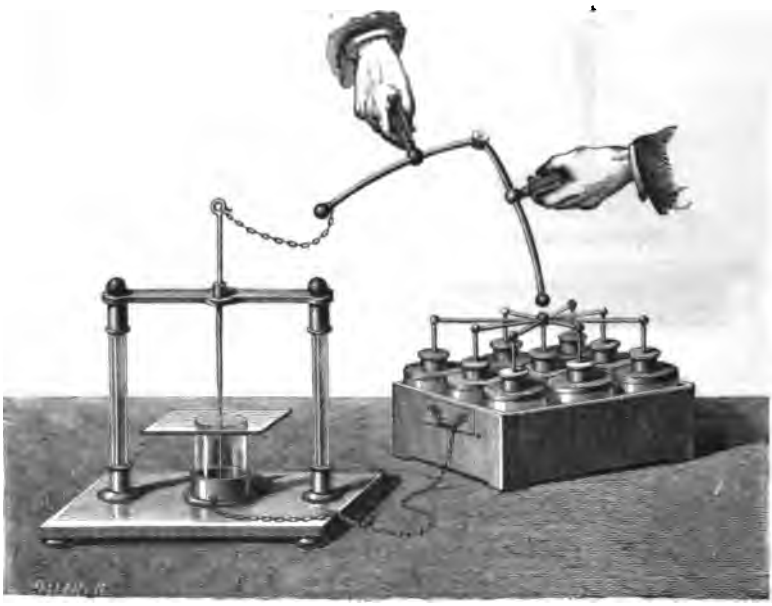


Fig. 388. Durchbohrung einer Glastafel.

die verflüchtigten Metalltheilchen auf einem Stücke Papier, gegen welches der Faden lehnt, sammeln und sieht dann auf dem Papiere einen schwar-

Digitized by Google

zen Strich, der aus sehr feinem Goldpulver gebildet ist. Es ist wahrscheinlich, daß diese Vorgänge ziemlich zusammengesetzt sind, daß außer der Temperaturerhöhung auch noch eine mechanische Uebertragung der Theilchen stattfindet; denn als Fusinieri den Funken zwischen einer

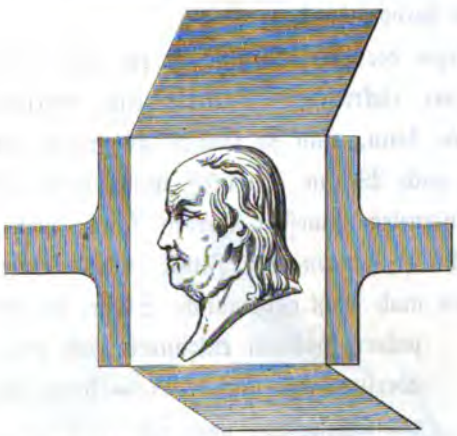


Fig 389. Metallischer Abdruck eines Bildes durch den elektrischen Schlag. Anordnung der einzelnen Theile.

Kugel aus Gold und einer anderen aus Silber überspringen ließ, so fand er, daß an der Stelle, wo der Ausgleich stattfand, das Gold versilbert und das Silber vergoldet erschien.

Man hat die Verflüchtigung der Metalle durch den elektrischen Schlag dazu benützt, um von Zeichnungen metallische Abdrücke her-

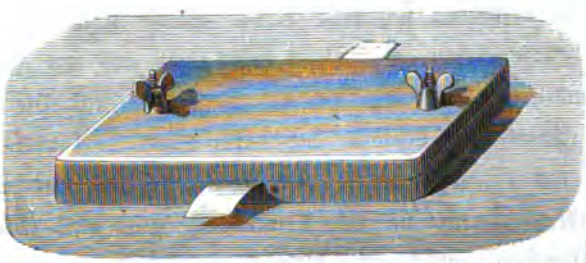


Fig. 390. Presse zur Herstellung der Bilder durch Elektricität.

zustellen, indem man das Bild in starkes Papier einschneidet, ein dünnes Goldblatt darüber deckt, darunter aber ein Stück weiße Seide ausspannt (Fig. 389). Das Ganze bringt man unter eine Presse (Fig. 390), durch welche alle Theile fest aufeinander gedrückt werden und aus der

Digitized by Google

nur zwei Stanniolstreifen hervorragen, die zu beiden Seiten an dem Papier befestigt sind. Läßt man durch diese Stanniolstreifen die Entladung der Batterie hindurch gehen, so verflüchtigt sich das Gold und dringt durch die Einschnitte des Papieres zu dem Seidenzeuge, wo es sich nach den Linien der Zeichnung niederschlägt und dadurch einen Abdruck des Bildes hervorbringt.

Das Schmelzen der Metalldrähte ist ein sicherer Beweis dafür, daß die Entladung der elektrischen Batterie eine bedeutende Temperaturerhöhung bewirken kann, und so können wir wohl annehmen, daß bei jeder Entladung auch Wärme entwickelt wird, wenn dieselbe auch weder durch ein Thermometer gemessen werden kann, noch auch für unsern Finger bemerklich ist, wenn der Funke nach demselben überspringt.

Daher werden auch leicht entzündliche Stoffe, wie Aether und Schießpulver, dadurch entzündet, daß man Funken auf sie überspringen läßt. Man kann dies z. B. dadurch ausführen, daß man sich selbst auf einen Isolirschemel stellt und mit der einen Hand den Conductor der Elektrisirmaschine erfaßt, aus einem Finger der anderen Hand aber einen Funken in ein Metallgefäß mit Aether überspringen läßt: der Aether entzündet sich dabei durch den Funken, der aus dem Finger hervorgeht. In ähnlicher Weise hat Watson Aether mit einem Funken entzündet, welcher aus einem Stücke Eis übersprang.

Fig. 391. Elektrische Pistole. Innere Ansicht.

Springt der Funken in einer Mischung von Sauerstoff und Wasserstoff über, so verbinden sich diese beiden Stoffe sofort und veranlassen dabei eine heftige Explosion. Man führt dies aus mit Hülfe der von Volta erfundenen elektrischen Pistole (Fig. 391 und 392). Dieselbe besteht aus einem Metallgefäße, das durch einen Kork verschlossen wird, nachdem es mit einem Gemische von Wasserstoffgas und Sauerstoffgas gefüllt wurde. Durch die Wand hindurch geht eine Glasröhre, die einen Messingstab umschließt, welcher beiderseits in Kugeln endigt. Bringt man die äußere Kugel dieses Stabes mit dem Conductor der Elektrisirmaschine in Berührung, während das Gefäß mit dem Boden in Verbindung gesetzt wird, so springt im Innern der Funke von der Kugel nach der Wand des Gefäßes über, das Glas explodirt und schleudert den Pfropfen weit fort. Auch noch andere chemische Vor-

Digitized by Google

gänge werden durch den elektrischen Funken bewirkt, wie die Bildung der Salzsäure aus Wasserstoff und Chlor, sowie die Zersetzung des Wassers, des Stickoxydules und des Ammoniak. Endlich wird auch der Sauerstoff der Luft in einen eigenthümlichen Zustand versetzt, in welchem er sich durch einen besonderen Geruch bemerklich macht und Ozon genannt

Fig. 392. Explosion der elektrischen Pistole.

wird. Diese Erscheinung macht sich besonders bei starken Blitzschlägen geltend und ist schon längst in diesen Fällen bemerkt worden, indem bei den meisten Berichten über Blitzschläge erwähnt wird, daß sich nach dem Schlage ein starker Geruch, den man am besten mit dem Geruche des Phosphors vergleichen kann, gezeigt habe.

Viertes Kapitel.

Galvanismus.

§ 1. Elektricität durch Berührung.

Bei allen Versuchen, welche wir bisher beschrieben haben, wurde die Elektricität einzig und allein durch eine mechanische Thätigkeit, nämlich

Digitized by Google

die Reibung hervorgerufen, und bis gegen Ende des vorigen Jahrhunderts kannte man für dieselbe keine andere Quelle. Da zeigte ein glücklicher Zufall mit einem Male den Physikern einen neuen Weg, wie man diese geheimnißvolle Kraft hervorrufen kann, und auf die erste Entdeckung folgte bald eine ganze Reihe neuer Wahrnehmungen, die ebenso wichtig für die Entwickelung der Theorie waren, als sie tief in das praktische Leben eingriffen. Mit allen diesen Erscheinungen sind aber für immer die unsterblichen Namen Galvani's und Volta's verknüpft.

Galvani, ein gelehrter Arzt und Professor der Anatomie an der Universität Bologna, war im Jahre 1780 eines Abends damit beschäftigt, in seinem Laboratorium mit einigen Freunden Versuche über die Nervenflüssigkeit der Thiere anzustellen. Sie benutzten dabei eine Elektrisirmaschine, neben welcher zufällig einige frischgetödtete und gehäutete Frösche lagen. Als einer der Gehülfen Galvani's aus Versehen mit der Spitze eines Messerchen den Schenkelnerv eines Frosches berührte, bemerkten sofort alle Umstehenden, daß die Muskeln des Thieres starke Zuckungen ausführten, und Galvani's Frau, welche gegenwärtig war und auch mit Erstaunen diese neue Erscheinung wahrnahm, machte zuerst darauf aufmerksam, daß das Zucken immer mit dem Entladen der Elektrisirmaschine erfolgte. Diese Entdeckung wurde für Galvani zum Ausgangspunkte zahlreicher Versuche, durch welche er die Uebereinstimmung zwischen der Nervenflüssigkeit der Thiere und der Elektricität nachzuweisen suchte, und durch welche er zu einer weiteren Entdeckung gelangte, welche der Wissenschaft ein ganz neues Feld eröffnete. Die Erklärung der Erscheinung selbst ergiebt sich für uns leicht aus den Gesetzen der Vertheilung der Elektricität: denn, wenn der Conductor sich allmählich mit positiver Elektricität ladet, so wird sich auch in dem Körper des Frosches die Elektricität langsam so vertheilen, daß sich die negative in den Punkten sammelt, die dem Conductor am nächsten liegen, die positive aber in den entferntesten Punkten. Wird nun der Conductor entladen, so verschwindet der Grund der Vertheilung und die Elektricitäten fließen wieder zusammen. So lange nun das Froschpräparat isolirt ist, ist auch die Menge der vertheilten Elektricität nur gering: sobald man aber dasselbe ableitet, so wird auch die Vertheilung stärker werden und der Ausgleich der Elektricitäten wird ein lebhaftes Zucken der Muskeln bewirken. Diese Erscheinung, die man an sich selbst beobachten kann,

Digitized by Google

wenn man sich in der Nähe eines Conductors aufstellt, aus dem Funken gezogen werden, bezeichnet man als den elektrischen Rückschlag.

Ungefähr um dieselbe Zeit hatte Benjamin Franklin den Beweis geführt, daß das Gewitter eine elektrische Erscheinung ist: um nun zu sehen, ob die Entladungen des Blitzes in ähnlicher Weise auf die Muskeln der Thiere wirkten, hängte Galvani im Jahre 1786 beim Herannahen eines Gewitters einige Froschpräparate mittels kupferner Haken an einem eisernen Geländer auf. Bevor das Gewitter herannahte, erhob sich ein Wind, durch welchen die Füße der Frösche gegen die eisernen Stangen des Geländers getrieben wurden, und mit Erstaunen sah Galvani, daß die Präparate in dem Augenblicke heftig zuckten, in welchem sie die Stäbe berührten, trotzdem daß eine Entladung der atmosphärischen Elektricität noch nicht erfolgt war.

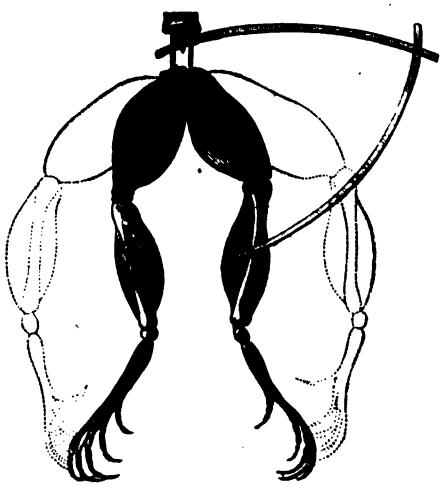


Fig. 393. Zusammenziehung der Muskeln eines Frosches durch Berührung mit zwei Metallen.

Diese Beobachtung führte Galvani zu der Ansicht, daß es eine Elektricität gebe, welche dem Organismus der Thiere eigenthümlich angehöre: der Hauptsitz dieser thierischen Elektricität seien die Muskeln, deren jeder eine doppelte Oberfläche besitze, auf denen sich die beiden Arten Elektricität ansammeln: jede einzelne Muskelfaser sei also mit einer Leydener Flasche zu vergleichen, welche auf ihren beiden Belegen mit den beiden Elektricitäten geladen sei. Galvani's Experimente wurden bald darauf durch Alexander Volta, Professor in Pavia, wiederholt: derselbe berührte Froschpräparate an ihren beiden Enden mit zwei verschiedenen Metallstäbchen und zeigte, daß ein Zucken erfolgte, sobald diese beiden Stäbchen unter sich zur Berührung gebracht wurden (Fig. 393). Hieraus schloß er, daß der Sitz der Elektricität nicht in den Muskeln des Thieres zu suchen sei, sondern daß die Metalle bei ihrem Zusammenstoße Elektricität entwickeln, indem das eine positiv, das andere negativ elektrisch wird, und daß der Ausgleich dieser Elektricitäten durch die Muskeln und Nerven des Frosches erfolge. Der Gegensatz dieser

Digitized by Google

Ansichten führte zu einem lebhaften wissenschaftlichen Streite zwischen den beiden berühmten Gelehrten, welcher für den einen so ehrenvoll ausfiel wie für den anderen und welcher die Wissenschaft mit vielem werthvollen Materiale bereicherte. Durch Erfindung seiner Säule errang zunächst Volta den Sieg: daß aber auch Galvani nicht im Unrechte war, wenn er die Nerven und Muskeln für Sitze der Elektricität erklärte, das haben spätere Untersuchungen, besonders die von Du Bois Reymond angestellten, bewiesen.

Um die Elektrometer, welche Volta zu seinen feinen Untersuchungen anwendete, empfindlicher zu machen, verband er sie mit einer Vorrichtung, welche im Principe mit den früher erwähnten zur Condensation der Elektricität angewendeten Apparaten übereinstimmt, dem Volta'schen Condensator (Fig. 394): an Stelle der Kugel schraubte er nämlich eine Messingplatte auf, die auf ihrer oberen Seite gefirnißt war, und setzte auf diese mittels eines isolirenden Handgriffes eine ebensolche, auf der unteren Seite gefirnißte Platte. Wenn er nun mit einem Stäbchen, das aus einem Stück Kupfer und einem Stück Zink gebildet war, die eine Platte des Condensators berührte und gleichzeitig die andere Platte durch den Finger ableitete, und hierauf die obere Platte durch den isolirenden Handgriff abhob, so zeigte sich, daß die Platte, welche mit dem Kupfer des Stäbchens berührt worden war, negative Elektricität besaß. Wollte er zeigen, daß durch Berührung mit dem Zinke die eine Platte positiv elektrisch wurde, so war es nothwendig, daß er zwischen Platte und Zink ein angefeuchtetes Stückchen Tuch einschaltete, so daß das Zink nicht mit der Platte des Condensators in unmittelbare Berührung kam. Volta nahm an, daß bei allen diesen Versuchen die Elektricität einzig und allein durch die Berührung der Metalle erzeugt wird, indem das Zink positiv, das Kupfer negativ elektrisch wird, und die Elektricität des Metalles, welches man bei jedem Versuche in der Hand hält, durch dieselbe nach dem Erdboden hin ab-

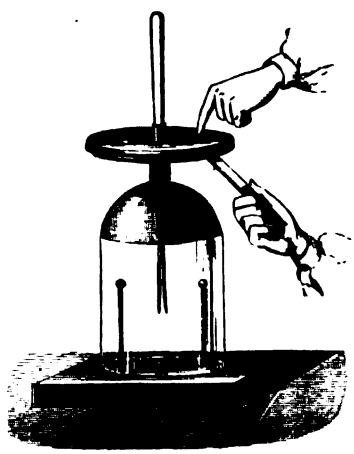


Fig. 394. Volta'scher Condensator.

Digitized by Google

fließt. In dieser Ansicht wurde er noch dadurch bestärkt, daß es ihm gelang, auch ohne Berührung mit der Hand und ohne Einschaltung eines Tuchstückchens die Anwesenheit von Elektricität nachzuweisen, als er an Stelle der Condensatorplatten eine nicht gefirnißte Kupfer- und eine ebensolche Zinkplatte anwendete.

Wenn man nun auch später eingesehen hat, daß die Anwesenheit des feuchten Tuchstückchens, welches Volta nur als einen Leiter der Elektricität ansah, auch bei der Erregung der Elektricität mitwirkt, so wollen wir doch vorläufig bei der Volta'schen Vorstellung stehen bleiben, und also annehmen, daß sich bei der Berührung zweier Metalle an denselben die entgegengesetzten Elektricitäten zeigen und sich mit einer gewissen Kraft von einander trennen wollen, welche man als elektromotorische Kraft bezeichnet. Wenn diese Ansicht auch durch spätere Untersuchungen etwas berichtigt worden ist, so führte sie Volta doch zur Entdeckung einer Vorrichtung, durch welche diese Elektricität, die man als galvanische Elektricität bezeichnet, in größerer Menge erzeugt werden kann. Es lag der Gedanke nahe, daß durch eine Wiederholung der erregenden Ursache auch eine Steigerung der Wirkung zu erzielen sei; es war also die Aufgabe, das Berühren von Kupfer oder Zink mehrmals nach einander eintreten zu lassen und die Elektricitäten, welche dadurch erzeugt wurden, nach einem Punkte hinzuleiten. Man mußte also Plattenpaare aus Kupfer und Zink so anordnen, daß bei allen die positive Elektricität nach der einen, die negative nach der anderen Seite hinfloß. Hätte man das nun in der Weise ausgeführt, daß man die Plattenpaare einfach über einander schichtete, so würde jede Knpferplatte des einen Paares mit der Zinkplatte des nächsten Paares in unmittelbare Berührung kommen und hierdurch würden neue Contactstellen entstehen, von welchen aus die Elektricität gerade in der entgegengesetzten Richtung fließen würde, als in welcher sie in den Paaren selbst fließt. Es war also nothwendig, die einzelnen Plattenpaare, welche man als galvanische Elemente bezeichnet, so von einander zu trennen, daß zwar die Elektricität von dem einen zum anderen überfließen kann, ohne daß jedoch dabei neue Berührung zwischen den Metallen stattfindet: und dies gelang durch Einschaltung der sogenannten flüssigen Leiter, z. B. verdünnter Säuren oder Salzlösungen. Dies sind die Principien, auf denen die Volta'sche Säule (Fig. 395) beruht, welche der genannte Gelehrte im Jahre 1800

Digitized by Google

erfand. Man stellt dieselbe dadurch her, daß man immer Platten aus Zink (Z) und Kupfer (C) und Tuchstückchen, die mit einer verdünnten Säure getränkt sind, sogenannte flüssige Leiter (f), übereinander schichtet und dabei beachtet, daß immer dieselbe Reihenfolge eingehalten wird (Fig. 396). In jedem Plattenpaare wird nun das Zink positiv elektrisch: diese Elektricität aber wird in der Säule weiter geleitet, sodaß sie besonders am Ende derselben sich anhäuft, während die negative nach dem anderen Ende hinfließt; man nennt diese beiden Enden, den positiven und den negativen Pol der Säule. Stellt man eine Säule

Fig. 395. Volta'sche Säule.

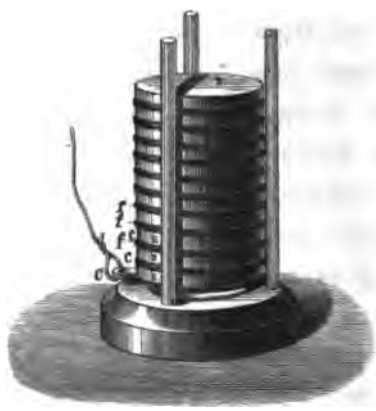


Fig. 396. Anordnung der Platten der Volta'schen Säule.

isolirt auf, und untersucht man die einzelnen Stellen derselben auf ihre Elektricität, so findet man nicht blos die Pole elektrisch, sondern auch andere Punkte der Säule, und nur in der Mitte derselben befindet sich ein Punkt, der keine Elektricität zeigt. Von diesem Punkte aus nimmt nach der einen Seite hin die positive, nach der anderen die negative Elektricität beständig zu, und beide werden in den Polen am stärksten.

Berührt man gleichzeitig beide Pole durch einen Leiter, so erfolgt eine Entladung der Elektricität: faßt man z. B. mit beiden Händen die Pole einer Säule aus ziemlich vielen Platten an, so empfindet man eine

Digitized by Google

Erschütterung, ähnlich wie bei der Entladung einer Leydener Flasche. Läßt man die Hände ruhig an ihrer Stelle, so hat man auch fernerhin eine eigenthümliche Empfindung, gleich als ob ein Strom von Wärme unsere Nerven durchzöge, und beim Loslassen der Hände empfinden wir wieder eine starke Erschütterung. Schließt man die Kette durch einen Draht, so sieht man an der Stelle, wo die Berührung erfolgt, einen Funken überspringen, und ebenso zeigt sich ein Funken beim Oeffnen der Kette. Führt man denselben Versuch öfters nach einander aus, so erscheint der Funke doch immer wieder mit derselben Lebhaftigkeit: ein Beweis, daß sich die Elektricität nach der Entladung sofort wieder ersetzt.

Wir haben bereits erwähnt, daß nicht allein die Berührung der Metalle Elektricität erzeugt, sondern daß auch die flüssigen Leiter dabei sehr thätig sind: und zwar ist es ein chemischer Vorgang, welcher hier die Elektricität erregt. Zum Beweise, daß die chemische Thätigkeit elektrische Erscheinungen hervorruft, können wir folgenden Versuch erwähnen. Taucht man in ein Gefäß mit verdünnter Salpetersäure, das zur Erde abgeleitet ist, eine Kupferplatte, welche mit der einen Platte des Condensators in Verbindung gesetzt ist, während man die andere Platte und die Säure zur Erde ableitet (Fig. 397),

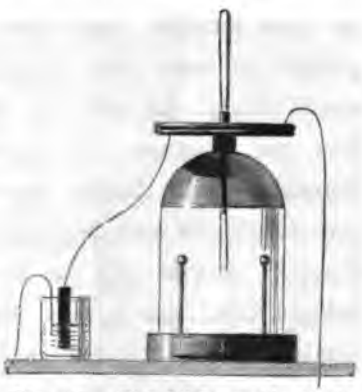


Fig. 397. Elektricität, welche durch chemische Thätigkeit erregt wird.

so zeigt sich jene Platte mit negativer Elektricität geladen. Wendet man statt des Kupfers Gold an, welches von der Säure nicht angegriffen wird, so zeigt sich keine Elektricität: dieselbe tritt aber sofort auf, sobald man in der Nähe der Goldplatte einige Tropfen Salzsäure zusetzt, durch welche die chemische Thätigkeit hervorgerufen wird. Auch, wenn andere Stoffe mit einander in Berührung kommen, welche chemisch auf einander wirken, wie Lösungen von Alkalien und verdünnte Säuren, so zeigen sich beide elektrisch, und zwar findet sich die positive Elektricität bei der Basis, die negative bei der Säure. Durch derartige Versuche sind mehrere Physiker zu der Ansicht gelangt, daß wohl alle galvanische Elektricität der chemischen Thätigkeit der flüssigen Leiter ihre Entstehung verdankt, daß sie also ihren Sitz nicht dort hat, wo sich die beiden Metalle be-

Digitized by Google

rühren, sondern an der Stelle, wo sie mit den Flüssigkeiten in Contact sind und von ihnen, wenigstens so lange, als die Elektricitätsentwickelung dauert, angegriffen werden. Diese Hypothese dürfte aber doch wohl etwas zu weit gehen, denn der Volta'sche Fundamentalversuch, bei welchem eine isolirte Zink- mit einer Kupferplatte in Berührung gebracht wurde und sich dennoch Elektricität zeigte, scheint unwiderleglich zu beweisen, daß die Metalle für sich allein schon eine Wirkung auf einander ausüben: und so dürfte es wohl am richtigsten sein, wenn man annimmt, daß jede Berührung zwischen Leitern, den metallischen sowohl, als den flüssigen, elektromotorische Kraft entwickelt, und daß die vereinigte Thätigkeit aller dieser Einflüsse die Elektricität der Säule hervorruft.

Verbindet man die beiden Pole einer Säule durch eine Leitung, sodaß ein Ausgleich der Elektricitäten stattfindet, so ersetzen sich dieselben doch, wie schon erwähnt, sofort wieder, und zwar so schnell, daß das Ausgleichen im Leiter ohne Unterbrechung fortdauert. Die positive Elektricität bewegt sich also in einem anhaltenden Strome vom positiven Pole zum negativen, die negative aber in umgekehrter Richtung. Der Einfachheit wegen beachtet man gewöhnlich nur die Bewegung der positiven Elektricität und bezeichnet sie als den positiven Strom der Säule: derselbe geht in der Säule jedesmal vom Zink durch den flüssigen Leiter zum Kupfer, also vom negativen zum positiven Pole, im Schließungsdrahte dagegen, welchen man einen Rheophor (Stromträger) nennt, vom positiven Pole zum negativen.

Vergleicht man die Vorgänge bei einer Säule mit denen bei einer Leydener Flasche, so bemerkt man in dem Auftreten der Elektricität sehr wesentliche Unterschiede. Bei der Flasche sammeln sich große Mengen von Elektricität an, die sich bei der Verbindung der Belege in verschwindend kurzer Zeit ausgleichen, um nicht wieder durch neue ersetzt zu werden: bis zur Entladung bleibt die Elektricität auf den Belegen aufgespeichert und in Ruhe, weshalb man sie auch als statische Elektricität bezeichnet, sie ist aber in sehr hoher Spannung, die sich durch einen erschütternden Schlag bei der Entladung Bahn bricht. Bei der Säule dagegen ist die Spannung nur gering; wird aber die Verbindung der Pole hergestellt, so strömt die Elektricität ohne Unterbrechung in gleicher Stärke fort, und ersetzt sich immer wieder aus dem Innern der Säule: man nennt sie dynamische Elektricität, nach dem Unter-

Digitized by Google

schiede, den man zwischen der Statik, oder der Lehre vom Gleichgewichte der Kräfte, und der Dynamik, oder der Lehre von der Bewegung der Körper, macht. Der Strom der Leydener Flasche tritt mit ungeheurer Gewalt auf, verschwindet aber sofort; der Strom der Volta'schen Säule ist verhältnißmäßig gering, aber dafür wirkt er ununterbrochen: jener ist gleich dem Schlage eines Hammers, der einmal mit großer Gewalt niederfällt, dieser ist der Tropfen, der beständig fallend den Stein höhlt.

Bei der Säule, wie sie Volta zuerst construirte, zeigt sich der Uebelstand, daß die oberen Platten durch ihre Last die Flüssigkeiten aus den Tuchstückchen auspreßten und daß dadurch einestheils die Stückchen austrocknen und an Leitungsfähigkeit verlieren, anderntheils aber durch die herabsickernde Flüssigkeit Nebenschließungen entstehen, welche der Säule

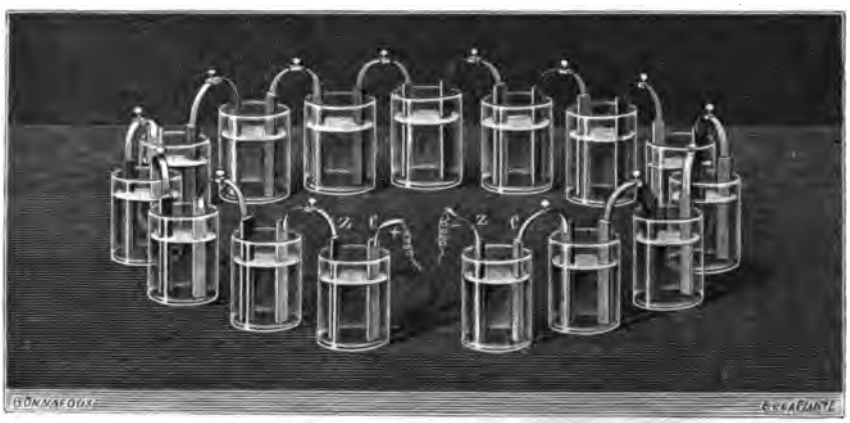


Fig. 398. Becherapparat nach Volta.

Kraft entziehen. Deshalb gab Cruikshank der Säule folgende Einrichtung: in einem länglichen Holzkasten setzte er Platten, die aus Kupfer und Zink bestanden, so ein, daß der Kasten in lauter sehr schmale Zellen getheilt wurde, welche er mit verdünnter Säure füllte. Einen solchen Apparat nennt man einen Trogapparat. Auch schon Volta hatte der Säule eine andere Form gegeben, indem er in einzelne Gläser, die mit Säure gefüllt waren, Kupfer- und Zinkplatten einhängte und immer die Kupferplatte des einen Gefäßes mit der Zinkplatte des nächsten durch einen Metallbügel in Verbindung setzte: auf die Weise bildete er den sogenannten Becherapparat (Fig. 398). Um beide Seiten der Zinkplatte auszunutzen, wendete Wollaston Kupferplatten an, die mehr als doppelt

Digitized by Google

so groß waren, als die Zinkplatten, und so gebogen wurden, daß sie auf beiden Seiten der Zinkplatte gegenüberstanden, ohne dieselbe jedoch

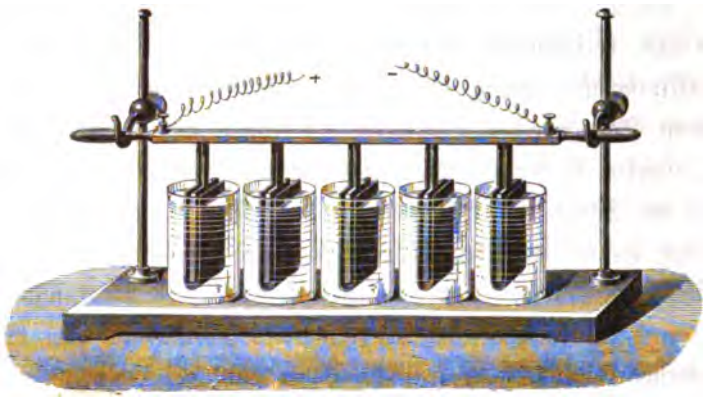


Fig. 399. Wollaston'sche Kette.

zu berühren. Alle Platten waren an einem Holzstabe befestigt, sodaß sie gleichzeitig in die Gefäße, die mit Säuren gefüllt waren, eingesenkt werden konnten (Fig. 399). Auch hier wurde jede Zinkplatte mit der Kupferplatte des nächsten Gefäßes in leitende Verbindung gesetzt. Noch größere Oberfläche bietet das Element, wie es von Hare angegeben ist, bei welchem eine lange Kupfer- und Zinkplatte spiralförmig umeinander gewunden sind, jedoch so, daß sie sich nirgends berühren (Fig. 400).

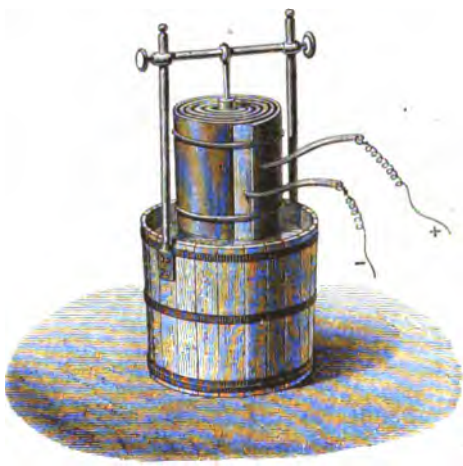


Fig. 400. Spiralförmiges Element nach Hare.

§ 2. Constante galvanische Ketten.

Wenn wir früher sagten, daß der Strom einer Volta'schen Säule immer in gleicher Stärke fließt, so ist dies nicht genau, sondern bald nach der Schließung ist derselbe am stärksten, nimmt aber darauf etwas ab. Der Grund hierfür liegt hauptsächlich in den chemischen Zersetzungen,

Digitized by Google

welche theils durch das Eintauchen der Metalle, theils durch die Einwirkung des Stromes selbst bewirkt werden. Zunächst wird das Zink, sobald es mit der Schwefelsäure in Verbindung kommt, von derselben sehr stark angegriffen und verbindet sich mit derselben und dem Sauerstoffe des Wassers zu Zinkvitriol. Um diesen Uebelstand zu vermeiden, überzieht man die Fläche des Zinkes mit Zinkamalgam, was schon dadurch geschieht, daß man Quecksilber auf dieselbe tropft, wenn sie von der Säure etwas angegriffen worden ist. Ist nun der Strom im Gange, so wird durch denselben, wie wir weiter unten besprechen werden, das Wasser zersetzt und es scheidet sich auf der Kupferplatte Wasserstoff aus,

Fig. 401. Daniell'sches Element.

welcher sie überzieht und ihre Wirksamkeit lähmt Man hat sich daher die Aufgabe gestellt, diese Ausscheidung des Wasserstoffes zu verhindern, und verschiedene Mittel kennen gelernt, durch welche dies bewirkt werden kann, durch welche also ein Strom erzeugt wird, der beständig in gleicher Stärke wirkt. Wir wollen jetzt die wichtigsten galvanischen Elemente bei denen dieses Ziel erreicht ist, und welche man *constante Elemente* nennt, kennen lernen.

Wir erwähnen zunächst das Daniell'sche Element: bei demselben (Fig. 401) steht in einem Glase ein der Länge nach geschlitzter Cylinder aus amalgamirtem Zinkblech, welcher ein Gefäß umschließt, das aus schwach

Digitized by Google

gebranntem poröſem Thone, ſogenanntem Biscuit, verfertigt iſt; in dieſes letztere wird ein Kupfercylinder eingeſetzt. In das Gefäß außerhalb der Thonzelle wird verdünnte Schwefelſäure, in das Innere der Thonzelle aber eine Löſung von Kupfervitriol gegoſſen und außerdem werden ungelöſte Stücke dieſes Salzes noch hinzugelegt, durch welche der Verluſt, der während der Thätigkeit des Elementes entſteht, immer wieder Erſatz findet. Sobald nun das Waſſer, durch welches die Schwefelſäure verdünnt iſt, zerſetzt wird, tritt der Sauerſtoff an das Zink heran, welches durch ihn oxidirt wird und ſich mit der Schwefelſäure zu Zinkvitriol verbindet, das auf den Boden des Gefäßes fällt. Der Waſſerſtoff da-

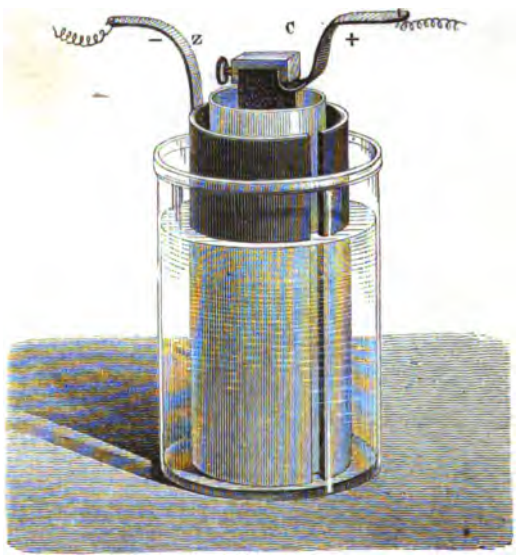


Fig. 402. Bunſen'ſches Element.

gegen dringt durch die Poren der Thonzelle und verdrängt aus dem Kupfervitriol das Kupfer, welches den inneren Kupfercylinder immer wieder von Neuem metalliſch überzieht.

Eine größere elektriſche Kraft entwickeln die Elemente nach Bunſen (Fig. 402), bei welchen an Stelle des Kupfers plaſtiſche Kohle und an Stelle des Kupfervitriols Salpeterſäure angewendet wird: dieſe letztere wird durch den eindringenden Waſſerſtoff eines Theiles ihres Sauerſtoffes beraubt und dadurch in ſalpetrige Säure verwandelt, die als bräunlicher Rauch entweicht. Statt der Kohle wendet Grove Platin an, wodurch noch kräftigere und beſonders auch reinlichere Elemente gebildet werden.

Digitized by Google

Will man stärkere Wirkungen erzielen, so verbindet man eine Reihe galvanischer Elemente in der Weise, daß das Zink des einen Elementes mit dem Kupfer oder der Kohle des nächsten Elementes in Berührung kommt, oder auch, wenn die Elektricität nur einen kurzen Weg durch-

Fig. 403. Galvanische Batterie.

laufen soll, auf dem sie wenig Widerstand findet, vereinigt man die Zinke aller Elemente unter sich und in gleicher Weise auch die Kohlen aller Elemente. Eine Vereinigung mehrerer Elemente nennt man eine galvanische Kette oder Batterie (Fig. 403).

§ 3. Physikalische, chemische und physiologische Wirkungen der Ströme.

Läßt man einen galvanischen Strom durch einen feinen Draht hindurchgehen, so wird derselbe erwärmt, wie dies bei der Entladung einer Batterie Leydener Flaschen geschieht: nur ist die Wirkung beim Strome eine viel stärkere. Schon wenn man die beiden Pole eines Wollaston'schen Elementes durch einen sehr dünnen Eisendraht von einigen Centimetern Länge mit einander verbindet, so erhitzt sich der Drath so stark, daß er rothglühend wird, ja daß er sogar schmilzt. Mit einer Batterie aus 21 Wollaston'schen Elementen kann man schon Platindrähte von 0,5 mm Durchmesser und 7 cm Länge schmelzen. Noch kräftigere Wirkungen erzielt man durch constante Elemente, und so genügt eine Bunsen'sche Batterie von 50 Elementen um Eisendrähte von mehr als 30 cm Länge und der Stärke einer Stricknadel unter lebhaftem Funkensprühen zu schmelzen. Bei diesen Glühversuchen kommt es mehr auf

Digitized by Google

die Größe, als auf die Zahl der Elemente an, und deshalb ist es vortheilhafter, die Elemente, die man zur Verfügung hat, so zu verbinden, daß alle Zinke einerseits und andererseits alle Kohlen zu einem Ganzen vereinigt werden. Beim Schmelzen zeigen die Metalle verschiedene Farben, das Eisen erscheint roth, das Zink bläulichweiß, das Gold gelb, das Silber weiß mit einem grünlichen Schimmer an den Rändern, das Kupfer grün, das Zinn purpurroth und das Blei gelb. Alle die genannten Metalle verbinden sich auch während des Schmelzens mit dem Sauerstoffe der Luft, und nur das Platin fällt in glänzendweißen Tropfen herunter, ohne dabei zu oxydiren.

Als wir den Versuch besprachen, bei welchem Drähte durch die Entladung einer Leydener Flasche geschmolzen wurden, erwähnten wir, daß nicht alle Metalle mit gleicher Leichtigkeit sich schmelzen ließen: dieselbe Bemerkung müssen wir jetzt für das Schmelzen durch den galvanischen Strom wiederholen, und können den Grund für diese Erscheinung nur darin finden, daß die verschiedenen Metalle dem Durchgange der Elektricität nicht gleichen Widerstand entgegensetzen. Je größer der Widerstand ist, den die Elektricität in einem Metalle findet, desto stärker wird auch die Erhitzung desselben sein. Setzt man daher einen Draht aus mehreren Stücken zusammen, die aus verschiedenen Metallen bestehen, und sendet man durch denselben einen galvanischen Strom, so sieht man, daß die einzelnen Stücke in verschiedenem Grade sich erhitzen: während ein Stück aus Platin weißglühend wird oder sogar schmilzt, bleibt ein anderes Stück aus Silber noch durchaus dunkel; und in der That hat man auch gefunden, daß das Platin dem Strome einen etwa zwölfmal so großen Widerstand entgegensetzt, als das Silber. Aus demselben Grunde erhitzt sich ein dünner Draht viel stärker, als ein dicker Draht aus demselben Metalle, da der Widerstand in jenem viel bedeutender ist.

Taucht man einen Metalldraht, der durch den galvanischen Strom zum Glühen gebracht ist, in Wasser, so läßt das Glühen nach, nicht allein weil der Draht seine Wärme an Wasser abgiebt, sondern auch noch aus einem anderen Grunde, den Davy durch ein merkwürdiges Experiment aufgefunden hat. Als der genannte Naturforscher nämlich einst einen Draht, der in Folge eines durchgehenden Stromes glühte, an dem einen Ende mit einem Stücke Eis berührte, so sah er, daß der Theil, der mit dem Eise in Berührung kam, dunkel wurde, der andere

Digitized by Google

Theil aber in noch stärkere Gluth gerieth und sogar schmolz. Die Erklärung für diese Erscheinung ergiebt sich daraus, daß der Draht, wenn er abgekühlt ist, dem Strome nicht mehr so großen Widerstand entgegensetzt: durch die Berührung mit dem Eise wird daher ein Stück des Drahtes zum besseren Leiter, deshalb wird der Strom stärker und schmilzt den nicht gekühlten Theil. Wenn man also einen Draht der ganzen Länge nach unter Wasser taucht, so steigt durch die Abkühlung seine Leitungsfähigkeit und folglich wird er auch nicht mehr in demselben Grade vom durchgehenden Strome erhitzt.

Befestigt man an den Polen einer kräftigen Batterie zwei Drähte, welche man mit einander in Berührung setzt, so sieht man in dem Augenblicke, wo sie sich berühren, zwischen beiden einen Funken überspringen:

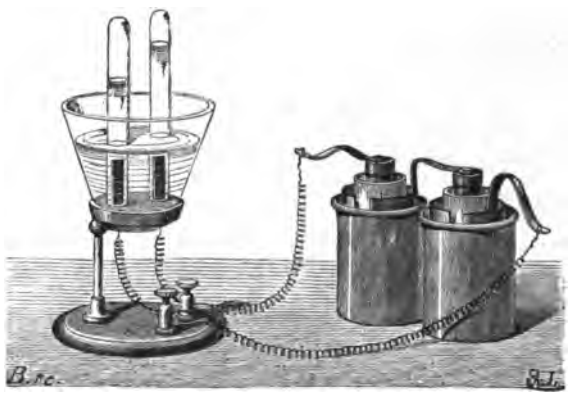


Fig. 404. Zersetzung des Wassers durch den Strom.

trennt man sie nun wieder, sodaß zwischen beiden ein kleiner Zwischenraum bleibt, so sieht man die Elektricität in einem ununterbrochenen Lichtbogen zwischen ihnen überfließen. Also auch hier zeigt sich der Unterschied zwischen der Entladung einer Leydener Flasche und einer galvanischen Batterie darin, daß bei der ersten ein einmaliger starker Lichtblitz erscheint, bei der letzteren aber ein dauernder Lichtstrom sichtbar wird. Wie man dieses Licht dadurch steigern kann, daß man die Elektricität zwischen Kohlenspitzen überfließen läßt, und wie man an Stelle der galvanischen Ströme auch andere Ströme, die wir noch erst kennen lernen wollen, mit Erfolg anwenden kann, das werden wir in dem Kapitel sehen, welches von den elektrischen Lichterscheinungen handelt.

Wird Elektricität durch Wasser hindurch geleitet, so wird dasselbe in

Digitized by Google

die beiden Bestandtheile zerlegt, aus denen es zusammengesetzt ist. Am besten eignet sich hierzu ein Apparat, den man mit dem Namen eines Voltameter bezeichnet (Fig. 404), weil in ihm durch die Menge des aufgefangenen Gases die Menge der Elektricität, die durch den Apparat hindurch gegangen ist, gemessen werden kann. Das Voltameter besteht aus einem Glasgefäße, durch dessen Boden zwei isolirte Drähte von Außen eindringen, welche Platinbleche tragen. Man füllt das Gefäß mit Wasser, dem man etwas Schwefelsäure zugesetzt hat, um seine Leitungsfähigkeit zu erhöhen, und stülpt über die Bleche zwei oben geschlossene, ebenfalls mit Wasser gefüllte Röhren, deren Inhalt durch Striche, die man auf der Oberfläche einritzt, in gleiche Theile getheilt ist. Läßt man einen Strom durch den einen Draht eintreten, durch den anderen Draht aber wieder zur Batterie zurückkehren, so sieht man, daß sich sofort an beiden Platinblechen Blasen anhängen, die sich in den oberen Theilen der Röhren sammeln, und es zeigt sich bald, daß die Menge des Gases auf der Seite, wo der Strom eintritt, nur halb so groß ist, als auf der anderen Seite. Untersucht man die Gase, so findet man am positiven Pole Sauerstoff, am negativen hingegen Wasserstoff, und zwar sind beide Gase von vorzüglicher Reinheit und zugleich ist der Sauerstoff in dem früher erwähnten Zustande, in welchem wir ihn als Ozon bezeichneten.

In derselben Weise, wie das Wasser, werden auch andere chemische Verbindungen, die aus zwei Elementen bestehen, durch den elektrischen Strom zersetzt, und es scheidet sich hierbei immer der Sauerstoff oder das Element, das seine Stelle vertritt, am positiven, das mit ihm verbundene Element dagegen, das man manchmal als Radical bezeichnet, am negativen Pole aus. Durch solche Mittel ist es Davy gelungen, eine Reihe neuer Metalle zu entdecken, die jetzt unter dem Namen der Alkalimetalle bekannt sind. Leitet man den Strom durch die Lösung eines Salzes, d. h. eines Körpers, der durch die Verbindung einer Säure und einer Basis gebildet ist, so scheidet sich am positiven Pole die Säure, am negativen die Basis aus; zugleich aber erfolgt auch eine Zersetzung des Wassers in Sauerstoff und Wasserstoff. Ist nun die Verwandtschaft des Wasserstoffs zum Sauerstoffe stärker, als die des Radicales, aus dem die Basis gebildet ist, so wird das letztere durch den Wasserstoff verdrängt, es entsteht wieder Wasser und das Radical erscheint als selbständiger Körper. Dies ist der Fall, den wir bei Besprechung der

Digitized by Google

Daniell'schen Elemente erwähnten. Ist dagegen die Basis z. B. eine Alkalie, so wird das Radical derselben vom Wasserstoffe nicht verdrängt und der letztere scheidet sich in Form von Blasen aus. Füllt man z. B. eine gebogene weite Glasröhre mit einer Lösung von Glaubersalz (Schwefelsaurem Natron), welche durch zugesetzte Lakmustinctur blau gefärbt ist, und hängt man von beiden Seiten in dieselbe Platinbleche, die man mit den Polen der Batterie in Verbindung bringt, sogenannte Elektroden, so scheidet sich an dem Bleche, welches mit dem negativen Pole in Verbindung steht, Wasserstoff in Form von Blasen und Natron aus, welches im Wasser gelöst bleibt: vom anderen Bleche aber steigen Sauerstoffblasen auf, und weiter sammelt sich auf dieser Seite der Röhre freie Schwefelsäure, durch welche die Lakmustinctur roth gefärbt wird. Die Zersetzung durch den galvanischen Strom, welche man Elektrolyse nennt, findet vielfach Anwendung bei der Herstellung metallischer Niederschläge: durch dieses Mittel lassen sich Gegenstände leicht sehr gleichmäßig vergolden und versilbern, und weiter stellt man Abdrücke von mancherlei Kunstgegenständen in Kupfer auf diese Weise dar und bezeichnet dieses Verfahren als Galvanoplastik.

Hat man zwei Platinbleche zur Zersetzung des Wassers benutzt und taucht man dieselben unmittelbar darauf in reines Wasser, so zeigt sich zwischen ihnen ein Strom. Ihre Oberflächen sind also bei dem Vorgange der Wasserzersetzung selbst in einen Zustand gerathen, den man mit dem Namen der Polarisation bezeichnet, d. h. sie sind elektrisch von einander verschieden, sodaß durch ihre Verbindung eine Spannung und ein Strömen der Elektricität bewirkt wird. Dieser Umstand ist hauptsächlich die Ursache, daß bei den Ketten, die nur eine Säure enthalten, die Stromstärke sehr bald abnimmt, ein Uebel, das bei den constanten Ketten dadurch vermieden ist, daß man die Ausscheidung des freien Wasserstoffes verhindert.

Geht der Strom durch die Nerven von Menschen oder Thieren, so erfahren dieselben Erschütterungen, deren Intensität hauptsächlich von der Zahl der Elemente, weniger von deren Größe abhängt; will man daher diese Wirkungen herbeiführen, so muß man die Elemente so anordnen, daß immer das Zink des einen mit dem Kupfer oder der Kohle des nächsten in Verbindung gebracht wird. Hat man eine Batterie aus sehr vielen guten Elementen, so muß man sich wohl hüten, daß nicht der

Digitized by Google

Strom durch den Körper hindurch geleitet werde: mit einer Batterie von 2000 Elementen hat man in London Pferde und Ochsen getödtet, und Gay-Lussac berichtet, daß er länger als einen Tag den Schlag gefühlt hätte, der ihm durch einen Trogapparat von 600 Elementen ertheilt worden sei. Die Elektricität wirkt auf beide Arten von Nerven, welche sich in unserem Körper vorfinden: in den Empfindungsnerven bewirkt sie Gefühle, die sich bis zum Schmerz steigern können; wird sie aber durch die Bewegungsnerven geleitet, so verursacht sie Zusammenziehungen der Muskeln, die als Zuckungen erscheinen. Auch die Art der Empfindung ist je nach der Natur der Nerven verschieden, sodaß z. B. der elektrische Strom im Sehnerven als Licht, in den Nerven der Zunge als ein besonderer Geschmack erscheint. Berührt man die Zungenspitze mit dem positiven Pol, so hat man einen säuerlichen, mit dem negativen Pole einen laugenhaften Geschmack; es ist hierbei aber nicht zu vergessen, daß bei der Berührung die Salze, die sich auf der Zunge finden, zersetzt werden, und dadurch wohl hauptsächlich die Verschiedenheit des Geschmackes bewirkt wird. Die Einwirkung auf die Nerven dauert auch noch einige Zeit nach dem Eintritte des Todes fort, wie sich schon bei den ersten Experimenten, welche Galvani und Volta mit den Schenkeln getödteter Frösche anstellten, gezeigt hat: auch an den Körpern enthaupteter Verbrecher sind durch Aldini in Bologna ähnliche Versuche angestellt worden, bei welchen in grauenhafter Weise durch den galvanischen Strom Bewegungen hervorgerufen wurden, wie sie der lebende Körper zeigt.

Fünftes Kapitel.

Elektromagnetismus und Induction.

§ 1. Wirkung eines Stromes auf die Magnetnadel. — Ampère's Gesetze.

Zwanzig Jahre nach der Entdeckung der Volta'schen Säule wurde durch den schwedischen Physiker Örsted eine neue Thatsache von der größten Tragweite gefunden, welche sowohl für die Wissenschaft als auch für die Technik von größerer Bedeutung war, indem der genannte Naturforscher den Einfluß nachwies, den der galvanische Strom auf die

Digitized by Google

Magnetnadel ausübt. Daß zwischen den magnetischen und elektrischen Erscheinungen ein Zusammenhang stattfindet, ahnte man schon lange: waren doch einige Fälle bekannt, bei welchen ein Blitzschlag, der ein Schiff traf, die Richtung des Magnetismus der Kompaßnadel umgekehrt hatte, und auch durch Entladung starker Batterien waren Nadeln, die in der Nähe der Leitungsdrähte lagen, magnetisch geworden. Den wirklichen Zusammenhang zwischen beiden Erscheinungen, wie wir ihn sogleich darstellen werden, aufzufinden, war Oersted vorbehalten. Zuvor wollen wir aber noch erwähnen, daß die Gesetze der Erscheinungen noch in demselben Jahre, 1820, in welchem Oersted seine Entdeckung gemacht hatte, durch Ampère weiter entwickelt wurden, und daß bald darauf Arago zeigte, daß sowohl weiches Eisen als auch Stahl unter dem Einflusse des galvanischen Stromes magnetisch wird. An die Versuche dieser drei Begründer der Lehre schlossen sich eine große Reihe neuer Experimente an, durch welche es immer klarer wurde, daß Magnetismus und Elektricität nur verschiedene Aeußerungen einer und derselben Naturkraft sind, und immer zahlreicher wurden die Erscheinungen aufgefunden, bei denen die eine dieser Naturkräfte durch die andere hervorgerufen wird.

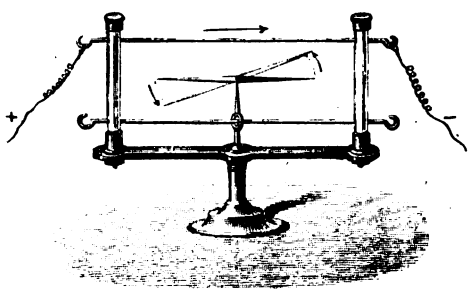


Fig. 405. Ablenkung der Magnetnadel durch einen galvanischen Strom.

Die Entdeckung Oersted's bestand darin, daß er zeigte, wie eine Magnetnadel, welche sich in horizontaler Richtung bewegen kann, durch einen Strom, der über sie hinweggeleitet wird, aus ihrer Richtung abgelenkt wird. Läßt man eine Magnetnadel auf einer Spitze frei schweben und bringt man in einiger Entfernung über ihr einen Draht in derselben Richtung an, in welche sich die Magnetnadel einstellt, so wird in dem Augenblicke, in welchem die Enden dieses Drahtes mit den beiden Polen einer Batterie so in Verbindung gesetzt werden, daß ein Strom durch ihn hindurch geht, die Nadel den magnetischen Meridian verlassen und mit der Richtung des Drahtes einen Winkel bilden (Fig. 405). Führt man den Draht unterhalb der Magnetnadel vorbei, so schlägt dieselbe nach der entgegengesetzten Seite hin aus; und ebenso kehrt

Digitized by Google

sich die Richtung des Ausschlagswinkels um, wenn sich die Richtung des Stromes umkehrt. Auch wenn der Draht senkrecht vor der Spitze der Magnetnadel vorbeigeführt wird, findet eine Abweichung derselben statt.

Nach welcher Seite die Magnetnadel ausschlägt, läßt sich nach einer von Ampère aufgestellten Regel sehr leicht im Voraus bestimmen, wenn man die Richtung des Stromes kennt. Denkt man sich nämlich in dem

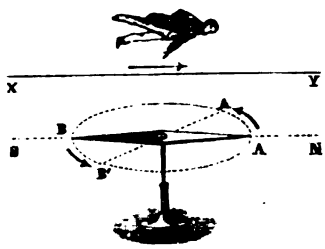


Fig. 406. Abweichung der Magnetnadel durch einen oberen Strom.

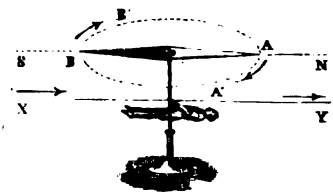


Fig. 407. Abweichung der Magnetnadel durch einen unteren Strom.

Strome selbst, in der Richtung des positiven Stromes schwimmend, und wendet man dabei das Gesicht nach der Nadel hin, so wird der Nordpol immer nach der linken Seite hin abgelenkt. Geht z. B., wie in Fig. 406, der Strom über der Nadel von Süd nach Nord, so wird nach dieser Regel die Nordspitze A nach Westen hin abgelenkt, die Nadel AB stellt sich also in A'B' ein; verläuft der Strom unter der Nadel in derselben Richtung, wie in Fig. 407, so muß die Ablenkung nach Osten hin stattfinden. Auch wenn man die Richtung des Stromes umkehrt, erkennt man aus derselben Regel, daß der Ausschlag nach der entgegengesetzten Seite stattfinden muß. Ebenso leicht läßt sich die Wirkung voraussagen, wenn Ströme senkrecht bei der Nadel vorbeigehen. Steigt ein Strom vor dem Nordpole auf (Fig. 408), so lenkt er die Nordspitze nach Osten hin ab, nach Westen hingegen, wenn es ein absteigender Strom ist.

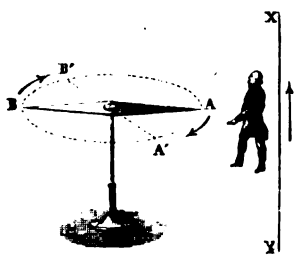


Fig. 408. Abweichung der Magnetnadel durch einen senkrechten Strom.

Die Gesetze, nach welcher sich die Größe der Ablenkung bestimmen läßt, sind zuerst besonders durch Biot, Savart, Laplace und Gauß aufgefunden worden: wir wollen nur erwähnen, daß die Wirkung um so

Digitized by Google

stärker ist, je kräftiger der Strom ist, durch den die Nadel abgelenkt wird, daß aber die Wirkung des Stromes abnimmt, wenn der Draht weiter von der Magnetnadel entfernt ist. Zwei Kräfte sind es, welche bei dieser Erscheinung wirksam sind: die Anziehung der Erde, welche die Nadel in der Richtung des magnetischen Meridianes halten will und die Wirkung des Stromes, welcher sie in eine hierzu senkrechte Richtung einstellen will. Aus beiden Kräften wird sich eine Mittelkraft ergeben, deren Richtung die Nadel einnimmt; wächst der Einfluß des Stromes, so wird der Winkel, den die Nadel mit dem magnetischen Meridiane einschließt, größer: nimmt jener Einfluß ab, so wird der Winkel kleiner. Könnte man die Nadel dem Einflusse des Erdmagnetismus entziehen, ohne daß sie dabei ihren eigenen Magnetismus verlöre, so würde sie sich selbst bei den geringsten Strömen senkrecht gegen dieselben einstellen: in welcher Weise dies annähernd erreicht ist, werden wir bald sehen.

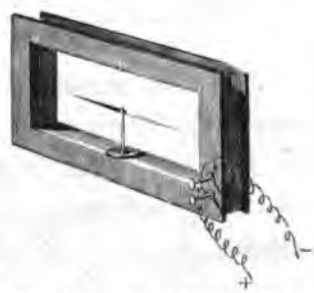


Fig. 409. Multiplicator nach Schweigger.

Die Ablenkung der Magnetnadel durch den Strom hat den Physiker Schweigger zur Construction eines Instrumentes geführt, durch welches sich Ströme von außerordentlich geringer Stärke noch nachweisen lassen: wir meinen den Schweigger'schen Multiplicator (Fig. 409). Dieser Apparat besteht aus einem Holzrahmen, um welchen ein Metalldraht in vielen Windungen gelegt ist: dieser Draht ist mit Seide übersponnen oder mit einer anderen isolirenden Substanz bedeckt, wodurch bewirkt wird, daß die Elektricität, die in ihn eintritt, die Windungen der ganzen Länge nach durchlaufen muß und nicht von einer Windung zur nächsten überspringen kann. Dieser Zweck wird auf die angegebene Weise bei galvanischen Strömen sehr wohl erreicht; denn wir wissen ja, daß bei denselben die Spannung der Elektricität nur eine geringe ist: bei stärkerer Spannung würde die Isolirung durch seidene Fäden nur wenig nützen, und daher darf man niemals den Funken einer Leydener Flasche durch jene Drahtwindungen hindurch senden. Der Holzrahmen wird aufrecht befestigt, sodaß seine Längsrichtung in die Richtung des magnetischen Meridianes fällt, und in seinem Innern wird eine Magnetnadel auf einer Spitze aufgestellt oder an einem Faden an-

Digitized by Google

gehängt. Geht nun ein Strom durch die Windungen, so lenkt jeder einzelne Theil des Drahtes die Nadel in demselben Sinne ab. Verfolgen wir z. B. die Wirkung der Theile einer einzelnen Windung (Fig. 410), in welcher der Strom von M nach N, Q, P läuft, um bei R die Windung wieder zu verlassen, so kann man sich nach der Ampère'schen Regel sehr leicht überzeugen, daß jedes Stück eine Ablenkung der Nordspitze a nach Osten hin bewirken muß; alle Theile dieser Windung werden sich daher in ihrer Wirkung unterstützen. Genau in derselben Weise, wie die erste Windung, wirkt auch die zweite, die dritte u. s. f., sodaß man die Gesammtwirkung erhält, wenn man die Wirkung einer Windung mit der Zahl der Windungen multiplicirt: daher der Name Multiplicator.

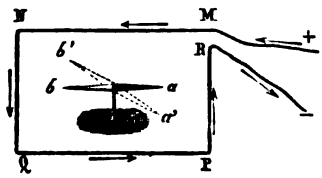


Fig. 410. Uebereinstimmung in der Wirkung der einzelnen Theile einer Windung.

Da die magnetische Kraft der Erde die Nadel immer wieder zurückziehen will, so kann der Ausschlag niemals so groß werden, als dies der Fall sein würde, wenn die Erdkraft nicht vorhanden wäre. Um daher das Instrument empfindlicher zu machen, hat Nobili eine Einrichtung ersonnen, durch welche der Einfluß der Erde fast ganz aufgehoben ist. An Stelle einer Nadel befestigt derselbe an einem Stäbchen zwei Nadeln von gleicher magnetischer Kraft in paralleler Richtung, jedoch so, daß auf der Seite, wo die eine ihren Nordpol hat, sich der Südpol der anderen befindet, und hängt dieselben an einem Seidenfaden so auf, daß das verbindende Stäbchen eine aufrechte Stellung hat, daß die eine Nadel im Innern der Windungen des Multiplicators, die andere aber über denselben schwebt. Ein solches System aus zwei Nadeln nennt man eine astatische Nadel.

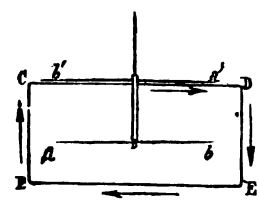


Fig. 411. Astatische Nadel.

Durch Anwendung einer astatischen Nadel hat Nobili den Schweigger'schen Multiplicator in ein sehr empfindliches Galvanometer (Fig. 412) verwandelt. Unter einer Glasglocke befinden sich die Windungen des Multiplicators, dessen Draht außerhalb in zwei Messingsäulen endigt, in welche die Poldrähte des Elektricität erregenden Körpers fast geschraubt werden können; die astatische Nadel hängt an einem Seidenfaden und

Digitized by Google

die obere Nadel bewegt sich über einem Theilkreise, auf welchem ihre Ablenkung abgelesen werden kann. Sind beide Nadeln vollkommen gleich stark magnetisch und in genau paralleler Stellung, so wird die Einwirkung des Erdmagnetismus vollständig vernichtet und der Ablenkung durch den Strom widersetzt sich nur der geringe Widerstand, den die Torsion des Fadens ausübt. In diesem Falle würden schon sehr geringe Ströme die Nadel in eine senkrechte Stellung zu den Windungen des Drahtes bringen, sodaß ein Messen der Stromstärke unmöglich ist, weil die Empfindlichkeit des Apparates zu groß ist. In der Regel ist aber die Magnetisirung beider Nadeln nicht ganz genau dieselbe, oder sie bilden auch miteinander einen sehr spitzen Winkel: in beiden Fällen werden sie sich in einer bestimmten Richtung zum magnetischen Meridiane einstellen, aber die Kraft, mit welcher der Erdmagnetismus sie in dieser Richtung halten will, ist sehr gering, sodaß schon schwache Ströme einen merklichen Ausschlag bewirken. Ehe man mit diesem Apparat Messungen anstellt, dreht man ihn so, daß sich die Nadeln den Windungen des Drahtes parallel einstellen, solange durch letzteren kein Strom geht, und zugleich sorgt man dafür, daß der Faden keine Torsion besitzt. Für kleine Ausschlagswinkel, etwa bis zu 20°, kann man die Stromstärke als proportional mit dem Winkel annehmen. Die Richtung des Stromes kann man aus dem Ausschlage der Nadel nach der Ampère'schen Regel sehr leicht bestimmen.

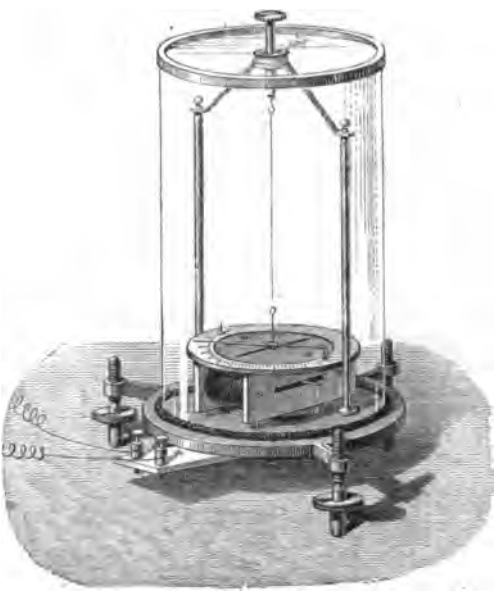


Fig. 412. Galvanometer.

Digitized by Google

§ 2. Wirkung der Ströme auf einander. — Theorie des Magnetismus.

Wie die Magnetnadel durch einen Strom aus ihrer Richtung abgelenkt wird, so zeigt sich in gleicher Weise auch der Einfluß, den ein Magnet auf einen Strom ausübt. Biegt man einen Draht in Form eines Rechteckes und hängt man ihn so auf, daß seine Enden in zwei mit Quecksilber gefüllte Näpfchen tauchen, sodaß sich das Rechteck um eine senkrechte Axe drehen kann, so wird es eine ganz bestimmte Stellung einnehmen, wenn es von einem Strome durchflossen wird und ein starker Magnetstab sich in seiner Nähe befindet (Fig. 413). Stellt man zunächst das Rechteck über dem Magnetstabe AB so ein, daß in der unteren Seite der Strom in der Richtung vom Nordpole A nach dem Südpole B hinläuft, so dreht es sich so, daß schließlich der Nordpol vom Strome aus gesehen links liegt. Aendert man die Richtung des Stromes, so dreht sich das Rechteck um einen Winkel von 180°. Allein nicht nur Magnet und Strom stehen in solcher Wechselwirkung zu einander, auch zwei Ströme üben auf einander Anziehung und Abstoßung aus, wie Ampère gezeigt hat. Nähert man nämlich zwei parallele Drähte, welche von Strömen durchflossen werden, so findet zwischen ihnen Anziehung statt, wenn die Stromrichtung in beiden dieselbe, Abstoßung, wenn sie die entgegengesetzte ist: ist daher der eine Draht beweglich, so wird er im ersteren Falle sich dem anderen nähern, im anderen sich von ihm entfernen. Bilden beide Drähte einen

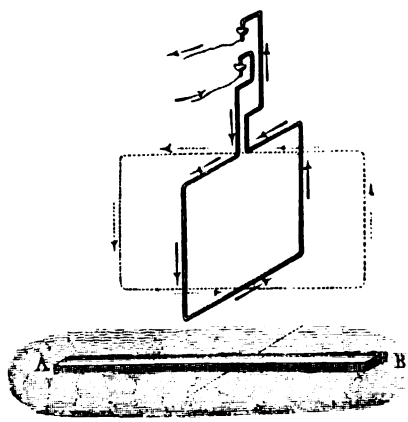


Fig. 413. Einwirkung eines Magneten auf einen Strom.

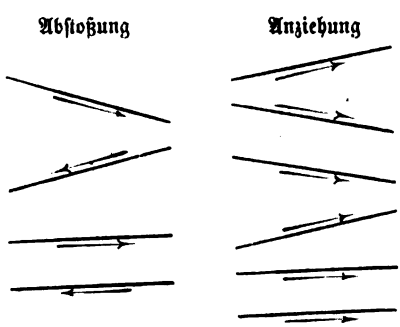


Fig. 414. Anziehung und Abstoßung zweier Ströme.

Digitized by Google

Winkel, so suchen sie sich parallel zu stellen, in solcher Weise, daß die Stromrichtung in beiden dieselbe ist. Laufen daher in beiden Schenkeln eines Winkels die Ströme nach dem Scheitelpunkte hin, so werden sich die Drähte nach einander hin bewegen; dasselbe ist der Fall, wenn in beiden Drähten die Ströme vom Scheitelpunkte fortfließen: fließt dagegen in dem einen Draht der Strom nach dem Scheitelpunkte hin, im anderen vom Scheitelpunkte fort, so stoßen sich die Drähte ab und suchen den Winkel zu vergrößern (Fig. 414).

Man hatte also gefunden, daß sich zwei Ströme in gleicher Weise anziehen oder abstoßen, wie dies bei einem Strome und einem Magneten der Fall ist: es lag der Gedanke nahe, daß zwischen Strom und Magnet ein wesentlicher Unterschied nicht bestehe, daß der Magnetismus sich also vollständig durch die Annahme erklären lasse, daß auch in allen magnetischen Körpern, mithin auch in der Erde, Ströme in bestimmter Richtung circuliren. Diese Annahme wurde zur Gewißheit, als Ampère zeigte, daß Rechtecke aus Draht von der Form der Fig. 413, welche von einem Strome durchflossen wurde, sich selbst so drehten, daß der untere Theil mit der Richtung des magnetischen Meridianes einen rechten Winkel bildete: es stellte sich dabei das Rechteck immer so ein, daß der Seitendraht, in welchem der Strom aufstieg nach Westen, der Seitendraht in welchem er abstieg nach Osten hin lag, daß also im unteren Drahte der Strom von Ost nach West verlief. Ebenso befestigte Pouillet einen senkrechten Draht an einer Axe, um welche er sich drehen konnte, ließ durch denselben einen Strom gehen und zeigte, daß der Draht immer sich am weitesten nach Osten oder nach Westen hin einstellte, je nachdem sich der Strom in ihm nach Unten oder nach Oben bewegte. Wurde aus dem Drahte eine Schleife in Form einer 8 gebildet, so war das System, wenn beide Schlingen recht gleichmäßig gebogen waren, ein astatisches. Der Einfluß der Erde in allen diesen Fällen war also kein anderer, als der eines Drahtes, durch welchen selbst ein Strom läuft, und alle Erscheinungen des Erdmagnetismus finden vollständige Erklärung, wenn man annimmt, daß die Erde in einiger Tiefe unter ihrer Oberfläche beständig von Strömen in der Richtung von Ost nach West umkreist werde. Für jeden Punkt der Oberfläche kann man immer an Stelle aller dieser einzelnen Ströme einen einzigen Strom setzen, der durch seine Wirkung ihre Einzelwirkungen vereinigt: in unseren Breiten

Digitized by Google

ist derselbe in südlichere Gegenden zu versetzen, umgekehrt wird er für einen Punkt der südlichen Halbkugel nach Norden hin liegen.

In gleicher Weise hat Ampère Magnetstäbe durch Drahtspiralen ersetzt, deren Windungen unter sich parallel und zu einer gemeinsamen Axe senkrecht waren. Er wickelte einen Draht auf einen Cylinder auf, bog dann die Enden des Drahtes nach der Mitte zurück, und ließ sie darauf aufsteigen, bis ihre Spitzen in Näpfchen eintauchten, durch welche ein Strom in sie geleitet werden konnte. Dieser Apparat, welcher sich um die Spitzen frei drehen kann, während die Axe der Drahtspirale immer horizontal schwebt, wurde als ein Solenoid bezeichnet (Fig. 415).

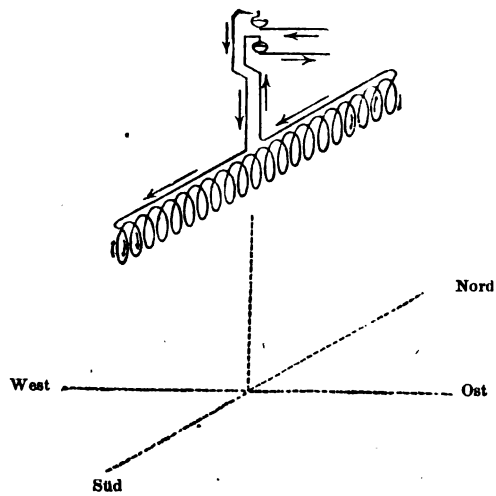


Fig. 415. Solenoid, welches sich in die Richtung des Meridianes einstellt.

Sobald durch das Solenoid ein Strom geleitet wird, stellt es sich genau in der Richtung des magnetischen Meridianes so ein, als ob sich in seiner Axe eine Magnetnadel befände, deren Nordspitze nach der linken Seite hin vom Strome aus gesehen liegt, wie es die Ampère'sche Regel angiebt. Befestiget man ein Solenoid so, daß es sich um eine horizontale Axe, die auf der Richtung des magnetischen Meridianes senkrecht steht, drehen kann, und daß es im indifferenten Gleichgewicht ist, ehe der Strom hindurchgeht, so neigt sich beim Durchfließen des Stromes seine Nordspitze genau, wie die Neigungsnadel.

Die Uebereinstimmung, welche auf diese Weise das Solenoid mit der Magnetnadel zeigt, läßt sich aber noch weiter verfolgen, indem Ampère gezeigt hat, daß die Enden zweier Solenoide sich anziehen oder abstoßen, je nachdem sie ungleichnamigen oder gleichnamigen Magnetpolen entsprechen, und eben dieselbe Wechselwirkung findet zwischen den Enden eines Solenoides und den Polen eines Stahlmagneten statt. Diese Erscheinungen haben Ampère dazu geführt, für den Magnetismus die folgende Theorie aufzustellen, durch welche die magnetischen Vorgänge als Wirkungen

Digitized by Google

elektrischer Ströme dargestellt werden. Nach dieser Theorie wird die Erdkugel beständig von einer Menge elektrischer Ströme durchzogen, die entweder chemischen Vorgängen ihre Entstehung verdanken, oder, was wahrscheinlicher ist, dadurch erregt werden, daß die einzelnen Theile der Erdoberfläche in der Richtung von Ost nach West nach einander von der Sonne erwärmt werden. Alle diese Ströme, welche wahrscheinlich an Stärke verschieden sind und auch wohl in ihren Richtungen nicht ganz genau übereinstimmen, wirken auf die Magnetnadel und bringen dieselbe in eine ganz bestimmte Lage. Ebenso sind die magnetischen Stoffe, Eisen, Stahl, Nickel u. s. w. Sitze für elektrische Ströme, welche um die einzelnen Gruppen der Atome circuliren. Solange sich bei einer solchen Substanz keine magnetische Polarität zeigt, werden die einzelnen Ströme in den verschiedensten Richtungen circuliren, sodaß sie sich in ihren Wirkungen gegenseitig stören. Sobald sich aber in den Körpern Magnetismus zeigt, so ist anzunehmen, daß sich nunmehr die Ströme

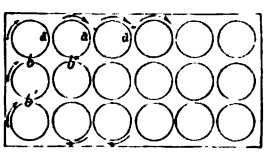


Fig. 416. Ströme, welche um die Molecüle eines Magneten laufen.

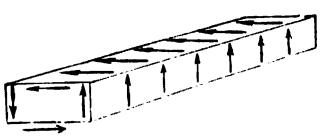


Fig. 417. Zusammensetzung der Ströme an der Oberfläche eines Magneten.

in einer übereinstimmenden Richtung, parallel zu einander, bewegen. Stellen z. B. die Ringe in Fig. 416 solche Ströme dar, wie sie um die Molecüle eines Magneten parallel zu einander verlaufen, so werden immer die Stücken der Ströme, welche unmittelbar an einander grenzen, wie z. B. bei den Punkten a, a', b, b', sich in entgegengesetzter Richtung bewegen und sich daher in ihrer Wirkung gegenseitig aufheben. Deshalb bleiben in jeder Schicht des Magneten nur die freiliegenden äußeren Stromtheile wirksam, sodaß der Erfolg derselbe ist, als würde jede Schicht nur von einem einzigen Strome umflossen. Hat man also einen Magnetstab, so ist die Wirkung desselben die gleiche, als würde er an seinem äußeren Umfange von Strömen so umkreist, wie es in Fig. 417 dargestellt ist.

Wird ein Stab aus weichem Eisen einem Magnetpole genähert, so richten sich augenblicklich seine Ströme parallel, sodaß er selbst zum

Digitized by Google

Magneten wird: sobald man ihn aber wieder entfernt, so fallen die Ströme in ihre vorige Unordnung zurück und der Stab verliert seinen Magnetismus. Viel langsamer erfolgt das Magnetisiren eines Stahlstabes, welcher dann aber den erlangten Magnetismus auch dauernd behält: im Stahlstabe können also die Ströme nicht so leicht ihre Richtung abändern, sie haben gleichsam eine Widerstandskraft zu überwinden, welche man mit dem Namen der Coërcitivkraft bezeichnet.

§ 3. Die Elektromagnete.

Im September 1820, kurze Zeit nach den Entdeckungen von Oersted und Ampère, tauchte Arago in Eisenfeilspäne einen Kupferdraht, der die beiden Pole einer galvanischen Kette mit einander verband, und bemerkte, als er ihn wieder aushob, daß die Späne an ihm hängen blieben, indem sie sich senkrecht zu demselben stellten; sobald er nun den Strom unterbrach, so fielen sofort die Eisentheilchen wieder ab. Um sich zu überzeugen, daß es sich hierbei um eine vorübergehende Magnetisirung handelt, und nicht um eine elektrische Anziehung, ersetzte er die Eisenfeile durch andere leichte Körper, die sich aber nicht magnetisiren lassen, und sah, daß keiner derselben angezogen wurde. Als er hierauf Nadeln aus weichem Eisen und aus hartem Stahle neben den Draht so legte, daß sie mit der Richtung desselben einen rechten Winkel bildeten, so fand er sie polar magnetisch, sobald der Strom durch den Draht ging, und zwar lag der Nordpol immer links vom Strome, wie es die Ampère'sche Regel verlangt; nach der Unterbrechung des Stromes verloren die Nadeln aus weichem Eisen sofort ihren Magnetismus, die Stahlnadeln aber blieben dauernd magnetisch. Bald darauf erkannte Arago und Ampère, daß die Magnetisirung des weichen Eisen und des Stahles eine viel größere Stärke erlangte, wenn die Stäbe in die Axe einer Drahtspirale oder eines Solenoides gebracht wurden. Deshalb wickelten sie den Leitungsdraht um eine Glasröhre, legten in dieselbe den Stab, der magnetisirt werden sollte, und schickten einen Strom durch den Draht, in Folge dessen die Stäbe sofort sehr starken Magnetismus zeigten.

Wie aus Fig. 418 zu ersehen ist, kann man den Draht auf zwei verschiedene Weisen aufwickeln: legt man die Röhre horizontal, und beginnt man an der linken Seite, so kann man den Draht zuerst nach

Digitized by Google

links umbiegen und dann eine Windung an die andere anschließen; denkt man sich in diesem Falle selbst in die Axe versetzt, so werden die einzelnen Windungen von links nach rechts verlaufen, und es ist daher eine rechtsdrehende Spirale gebildet: im entgegengesetzten Falle aber ist die Spirale links drehend. Mag die Drehung in dem einen oder anderen Sinne erfolgen, so kann man jedes Mal die Lage des Nordpoles a dadurch bestimmen, daß man sich selbst in den Strom versetzt mit demselben schwimmend denkt, denn dann liegt der Nordpol immer zur linken

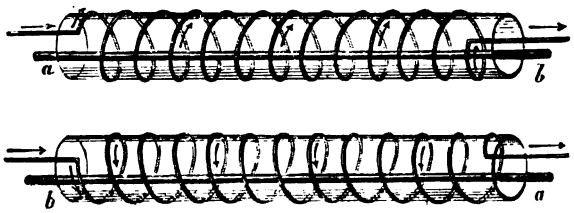


Fig. 418. Magnetisirung einer Stahlnadel durch ein Solenoid. Rechts und links drehende Spiralen.

Hand. Durch dieses Verfahren ist es auch leicht, in einem Magnetstabe Folgepunkte zu erzeugen: man braucht nur die Spirale abwechselnd nach rechts und nach links zu wickeln, wie es in Fig. 419 dargestellt ist. Tritt in die abgebildete Spirale von links her ein Strom ein, so hat der Stab an seinem linken Ende bei a einen Nordpol, auf welchen bei b ein Südpol folgt; in einiger Entfernung findet sich ein zweiter Nordpol a und endlich an der Spitze rechts ein zweiter Südpol b.

Fig. 419. Erzeugung von Folgepunkten.

Wie erwähnt, ist der Magnetismus im weichen Eisen, der durch eine Spirale erregt wurde, nur vorübergehend: seine Kraft ist um so größer, je reiner und gleichmäßiger das Eisen ist und je größer die Zahl der Windungen der Spirale ist. Um die letztere Bedingung leicht erfüllen zu können, umgiebt man den Metalldraht mit einer isolirenden Hülle, man überspinnt ihn z. B. mit Seide, wie beim Schweigger'schen Multiplicator, und wickelt ihn hierauf in engen Windungen dicht um den Kern aus weichem Eisen. Einen solchen Eisenkern mit Spirale

Digitized by Google

nennt man einen Elektromagnet, weil er nur so lange magnetisch bleibt, als ein Strom den Draht der Spirale durchfließt, in dem Augenblicke aber, wo der Strom unterbrochen wird, seinen Magnetismus verliert.

Gewöhnlich giebt man dem Eisenkerne die Form eines Cylinders,

Fig. 420. Hufeisen-Elektromagnet.

Fig. 421. Elektromagnet.

der wie ein Hufeisen gebogen ist, und bedeckt jeden Schenkel desselben mit einem Theile des Drahtes (Fig. 420). Auf den beiden Schenkeln scheinen die Drähte in umgekehrter Richtung aufgewickelt zu sein: denkt man sich aber den gebogenen Eisenstab wieder gestreckt, so erkennt man leicht, daß er in der That auf beiden Seiten in demselben Sinne umwickelt ist: daher entstehen an beiden Enden ungleichnamige Pole, sobald ein Strom den Draht durchfließt. Manchmal nimmt man auch zwei getrennte Eisenstäbe, die in entgegengesetztem Sinne von einem gemeinsamen Drahte umwunden und nebeneinander aufgestellt sind, und verbindet sie an dem einen Ende durch einen eisernen Stab, an dem anderen durch eine dünne Kupferplatte (Fig. 421). Die Kraft eines Elektromagneten hängt von der Zahl der Windungen, von der Stärke des Stromes, und endlich auch von den Dimensionen des Eisenkernes ab; es ist aber nicht

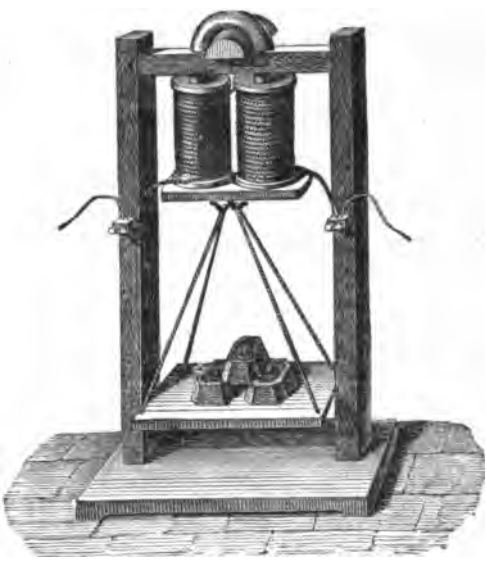


Fig. 422. Belasteter Elektromagnet.

Digitized by Google

schwer, auch selbst kleinere Elektromagneten zu construiren, welche mittels eines an die Pole angelegten Ankers ziemlich große Lasten tragen (Fig. 422): Pouillet hat einen Elektromagnet construiren lassen, welcher mehrere Tausend Kilogramme tragen kann. Nähert man dem Elektromagneten Eisenkörper, so werden dieselben mit der größten Lebhaftigkeit angezogen: so kann man aus Nägeln eine zusammenhängende Kette, ein förmliches Netz bilden lassen, das sofort wieder zerfällt, sobald der Strom unterbrochen wird (Fig. 423).

Die Geschwindigkeit, mit welcher das weiche Eisen unter dem Einflusse des elektrischen Stromes magnetisch wird und nach der Unterbrechung

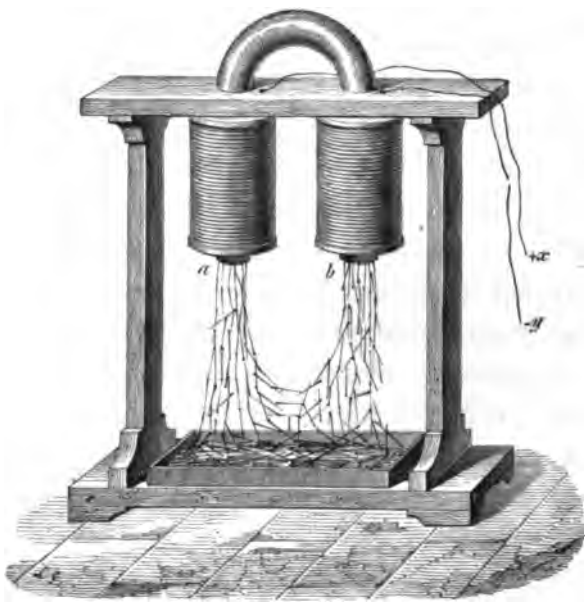


Fig. 423. Kette aus Nägeln bei einem Elektromagneten.

seinen Magnetismus wieder verliert, hat zu vielen wichtigen Anwendungen des Elektromagneten geführt. Eine Zeit lang hat man versucht, ihn zum Betriebe von Kraftmaschinen zu benutzen, allein diese Versuche haben zu keinem günstigen Resultate geführt, da die entwickelte Kraft zu den Betriebskosten in keinem Verhältnisse stand; wo es sich dagegen darum handelt, kleine Bewegungen mit großer Präcision auszuführen, da ist dieser Apparat durchaus an seinem Platze. Welchen Einfluß er auf unser ganzes modernes Leben gewonnen hat, indem durch ihn Nachrichten in meilenweite Entfernungen in einem Augenblicke übertragen werden,

Digitized by Google

das bedarf wohl kaum der Erwähnung: auf seine Anwendung für die Telegraphie aber einzugehen, würde hier nicht am Platze sein, wo wir nur von den physikalischen Erscheinungen, und nicht von deren Anwendungen auf das praktische Leben zu handeln beabsichtigen.

§ 4. Erscheinungen der Induction.

Im November 1831 entdeckte Faraday, einer der größten Physiker unseres Jahrhunderts, folgende höchst merkwürdige Thatsache: wird ein Strom durch einen Draht geleitet, so entsteht in demselben Augenblicke in einem benachbarten, dem ersten parallelen Drahte ebenfalls ein Strom, der sich in der entgegengesetzten Richtung als der erste, bewegt. Man kann die Existenz dieses zweiten Stromes dadurch nachweisen, daß man die Enden des zweiten Drahtes, der von dem ersten durch eine isolirende Schicht getrennt ist, mit einem Galvanometer in Verbindung setzt: in dem Augenblicke, wo der Strom in den ersten Draht eintritt, schlägt die Nadel des Galvanometers aus, kehrt aber sofort in ihre Ruhelage zurück, trotzdem daß der Strom im ersten Drahte weiter circulirt. Sobald man aber diesen Strom unterbricht, so zeigt sich ein Ausschlag der Nadel nach der entgegengesetzten Seite hin: ein Beweis, daß nunmehr in dem zweiten Drahte ein Strom entstanden ist, der mit dem ursprünglichen Strome gleiche Richtung hat. Man bezeichnet diese Erscheinung, bei welcher ein Strom durch den Einfluß eines entstehenden oder verschwindenden galvanischen Stromes gebildet wird, als Induction, und nennt den Strom, der sie hervorruft, inducirenden Strom, die Ströme aber, die durch seinen Einfluß im zweiten Drahte gebildet wurden, Inductionsströme, und zwar den ersten den Schließungsstrom, den anderen den Oeffnungsstrom. Auch Magnete können Inductionsströme erregen, ebenso wie die Ströme einer galvanischen Kette; endlich hat Masson im Jahre 1834 bewiesen, daß auch der Entladungsschlag einer Leydener Flasche, in benachbarten Leitern Ströme inducirt.

Will man etwas stärkere Inductionsströme erregen, so muß man Drähte von beträchtlicher Länge anwenden: um dieselben bequem handhaben zu können, umspinnt man sie mit Seide und wickelt sie auf hohle Holzcylinder, welche man dann als Rollen oder Drahtspiralen bezeichnet.

Digitized by Google

Die beiden Enden des Drahtes setzt man mit zwei Metallknöpfen in Verbindung, in welche sich entweder die Leitungsdrähte einer Säule, oder auch Drähte, die zu einem Galvanometer führen, leicht einschrauben lassen. Man nimmt gewöhnlich eine kleinere Rolle und eine andere, die so weit ist, daß sich die erstere in das Innere ihrer Höhlung einschieben läßt: die größere Rolle, welche Inductionsrolle heißt, setzt man mit einem Galvanometer in Verbindung, die kleinere oder inducirende Rolle verbindet man aber, nachdem sie in die größere eingeschoben ist, mit den Polen einer galvanischen Kette. In dem Augenblicke wo der Strom geschlossen ist, zeigt der Ausschlag der Nadel an, daß ein Strom, der dem inducirenden entgegengesetzt gerichtet ist, die Inductionsrolle durchläuft, da aber die Nadel nach einigen Schwankungen ihre Ruhelage wieder einnimmt, so kann der Instructionsstrom nur von

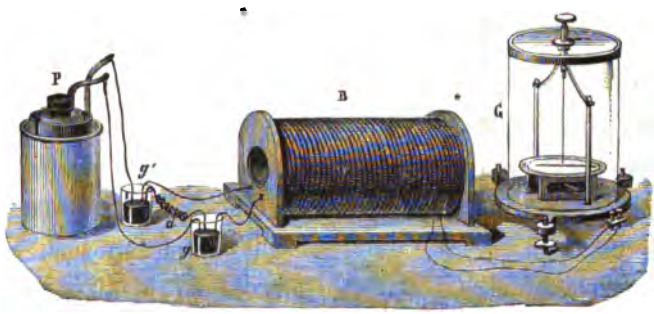


Fig. 424. Induction durch einen Strom.

ganz kurzer Dauer gewesen sein. Unterbricht man die galvanische Kette, so schlägt die Nadel nach der anderen Seite hin aus; doch auch dieser Strom ist nur von kurzer Dauer. Man kann die beiden Drähte auch auf ein und dieselbe Rolle winden, wenn sie nur gut von einander isolirt sind und mit verschiedenen Knöpfen in Verbindung stehen (Fig. 424). Den einen Draht verbindet man mit einem Galvanometer G, den anderen mit zwei Schalen voll Quecksilber g und g', welche mit den Polen eines galvanischen Elementes in Verbindung stehen. Auf diese Weise kann man durch Eintauchen und Ausheben eines Drahtes den Strom leicht schließen und öffnen.

Ist die inducirende Rolle für sich selbständig und läßt man dieselbe immer mit dem galvanischen Elemente in Verbindung, sodaß sie beständig von einem Strome von gleicher Stärke durchflossen wird, so zeigen sich

Digitized by Google

auch Inductionsströme, sobald man sie in die Inductionsrolle einschiebt oder aus derselben wieder zurückzieht (Fig. 425), und zwar ist die Richtung beim Einschieben wieder dem ursprünglichen Strome entgegengesetzt, beim Herausheben aber mit ihm übereinstimmend. Endlich tritt dieselbe

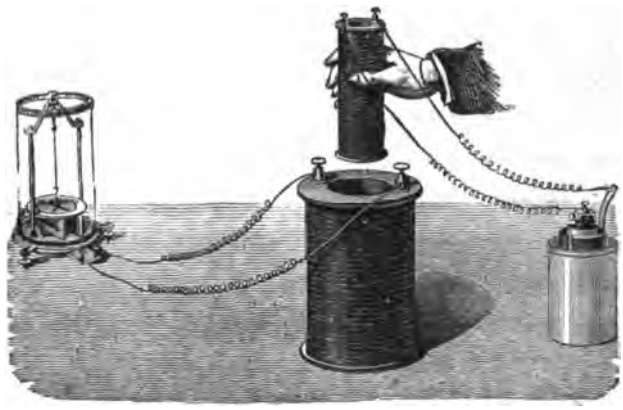


Fig. 425. Induction durch Annäherung eines Stromes.

Erscheinung ein, sobald der Strom, der den inducirenden Draht durchläuft, aus irgend einem Grunde an Stärke zunimmt oder schwächer wird. Diese Beobachtung läßt sich mit dem Apparate Figur 424 anstellen, wenn man die beiden Gläser mit Quecksilber noch durch einen Draht d verbindet, weil sich dann der Strom des Elementes theilen muß und nur ein Theil desselben die inducirende Rolle durchläuft. Hebt man den Draht d aus, so geht der Strom in aller Stärke durch die Rolle, nimmt also an Intensität zu: setzt man den Draht wieder ein, so theilt sich der Strom wieder und seine Intensität in der Rolle nimmt ab. Fassen wir die Resultate noch einmal zusammen, so haben wir gesehen, daß in einem Drahte ein Inductionsstrom in entgegengesetzter Richtung erregt wird, sobald in seiner Nähe ein Strom entweder entsteht, oder sich ihm nähert, oder an Stärke zunimmt: daß dagegen ein Inductionsstrom in gleicher Richtung sich zeigt, wenn ein Strom entweder verschwindet, oder sich entfernt, oder an Stärke abnimmt.

Fig. 426. Induction durch einen Magneten.

Ganz dieselben Erscheinungen zeigen sich auch, wenn man die

Digitized by Google

inducirende Rolle durch einen Magneten ersetzt, und hierdurch ist die Theorie des Magnetismus von Ampère von Neuem bekräftigt worden. Schiebt man sehr schnell einen Magneten in eine Inductionsrolle, welche mit einem Galvanometer in Verbindung steht, so wird ein Strom angezeigt, der den Strömen entgegengesetzt gerichtet ist, die nach Ampère's Theorie den Magneten umkreisen; beim Zurückziehen des Magneten entsteht dagegen ein gleich gerichteter Strom (Fig. 426).

Der Versuch gelingt auch schon, wenn man den Magnetpol nur bis an die Rolle heranschiebt, nur ist dann die Wirkung um so viel schwächer: schiebt man aber in die Spirale einen Kern von weichem Eisen, und nähert demselben den Magneten, so zeigen sich wieder viel stärkere Inductionsströme (Fig. 427). Also auch dadurch, daß der Eisenkern

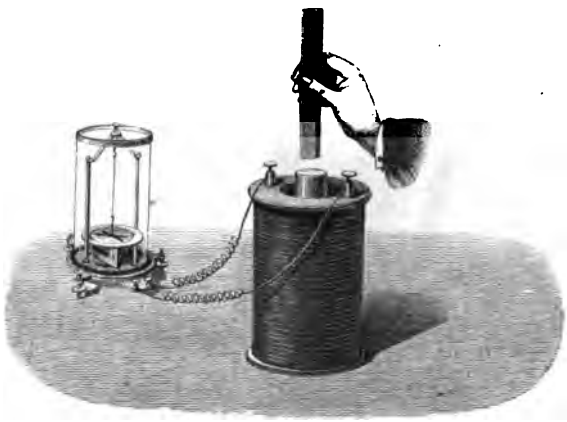


Fig. 427. Induction durch das Entstehen oder Verschwinden des Magnetismus.

magnetisch wird oder seinen Magnetismus verliert, werden Inductionsströme erzeugt, und ebenso zeigen sich dieselben, wenn durch größeres Annähern oder durch Entfernen des Magneten der Eisenkern stärker oder schwächer magnetisch wird, sodaß sich die obigen Bemerkungen auch auf Inductionsströme, die durch einen Magneten erregt werden, übertragen lassen.

Da die Inductionsströme viel stärker sind, als die Ströme durch welche sie erregt werden, so hat man durch geschickte Anordnung der einzelnen Theile Maschinen construirt, welche sehr kräftige elektrische Wirkungen hervorrufen, und welche man mit dem Namen der Inductionsmaschinen bezeichnet.

Digitized by Google

Wir erwähnen unter diesen an erster Stelle die magneto-elektrische Rotationsmaschine, die zuerst in einiger Vollkommenheit von Clarke construirt wurde (Fig. 428). Dieselbe besteht aus einem starken Hufeisenmagnet AB, der aus mehreren Platten zusammengesetzt und an einem Stative befestigt ist: vor den Polen des Magneten befinden sich zwei Drahtrollen, welche zwei Cylinder aus weichem Eisen als Kerne tragen. Beide Rollen sind mit einem und demselben feinen übersponnenen Kupferdrahte umwickelt, doch so, daß derselbe bei der einen Rolle eine rechts-

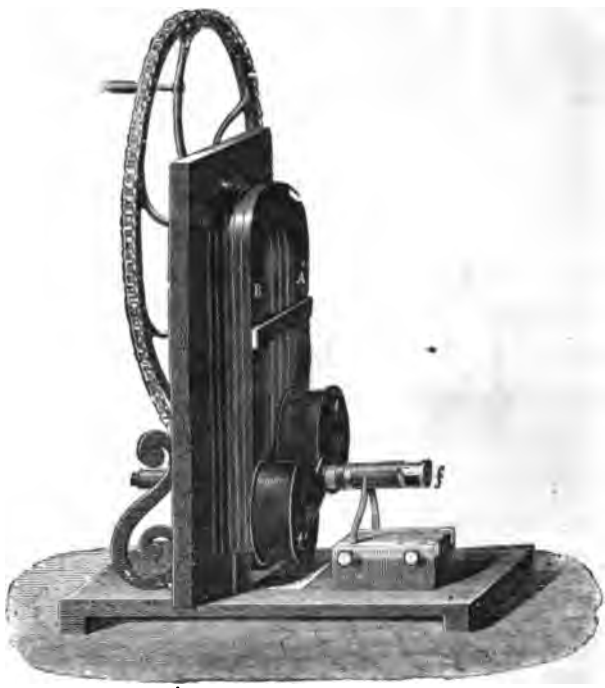


Fig. 428. Magneto-elektrische Rotationsmaschine nach Clarke.

drehende, bei der anderen eine linksdrehende Spirale bildet. Die beiden Eisenkerne sind auf der Seite welche dem Magneten zugewendet ist, durch eine dünne Kupferplatte, auf der abgewendeten Seite aber durch ein eisernes Querstück mit einander verbunden: dieses Querstück ist an einer Axe befestigt, welche durch einen Schnurlauf in schnelle Umdrehung versetzt werden kann. Während jeder Umdrehung nähern sich die Rollen mit ihren Kernen abwechselnd den beiden Polen des Magneten und entfernen sich wieder von denselben, wodurch Inductionsströme erzeugt werden.

Digitized by Google

die beim Annähern den Strömen des Magneten entgegengesetzt, beim Entfernen gleich gerichtet sind. Da nun die Ströme in den Magneten an beiden Polen entgegengesetzt gerichtet sind, der Draht auf beiden Rollen aber auch in entgegengesetztem Sinne aufgewickelt ist, so wird der Draht in beiden Rollen von den Strömen immer in gleicher Richtung durchlaufen. Haben sich die Rollen den Polen gegenüber gestellt und werden dieselben weitergedreht, sodaß sie sich nun von den Polen entfernen, so kehrt sich die Stromrichtung in beiden Rollen um, stimmt also wieder in beiden Theilen des Drahtes überein. Die Enden des Drahtes werden zu Metallringen geleitet, die auf der Axe auffitzen und gegen welche Federn schleifen, durch welche der Strom weiter geleitet wird. Durch eine Vorrichtung, die wir am Ende des Paragraphen besprechen werden, durch den sogenannten Commutator, tritt nach jeder halben Umdrehung ein Wechsel in der Berührung der Federn und Ringe ein, sodaß in den Drähten, die mit den Federn in Verbindung stehen, die Stromrichtung immer dieselbe bleibt, trotzdem daß sie sich in den Rollen selbst nach jeder halben Umdrehung ändert. Um die Verbesserung dieses Apparates hat sich besonders Stöhrer verdient gemacht, welcher Apparate erbaut, durch welche die größten Wirkungen erzielt werden können, wie sie durch die einfache galvanische Säule niemals zu erreichen sind. Durch seine Vorrichtungen kann man lange Metalldrähte schmelzen, ein sehr starkes elektrisches Licht erzeugen, Wasser in größeren Mengen zersetzen und die stärksten Thiere, z. B. Walfische, tödten.

Eine andere Maschine, durch welche sich ebenfalls sehr starke Wirkungen erzielen lassen, ist der Ruhmkorff'sche Inductionsapparat (Fig. 429), bei welchem die Ströme durch einen galvanischen Strom inducirt werden. Bei demselben ist ein ziemlich dicker Kupferdraht von nicht zu großer Länge um eine Rolle gewickelt und mit zwei Klemmschrauben f und f' in Verbindung gesetzt. Um diesen schlingt sich ein sehr feiner Draht von bedeutender Länge, in welchem die Inductionsströme erzeugt werden: die Enden dieses Drahtes stehen in Verbindung mit zwei Schrauben A und B, von welchen aus Drähte weiter geleitet werden. Im Innern der Rolle befindet sich ein Bündel dünner Stäbe aus weichem Eisen, durch welches einmal der Inductionsstrom verstärkt, andererseits häufige Unterbrechung des Stromes bewirkt wird. Denn, während die eine Schraube f unmittelbar mit dem einen Pole der erregenden galva-

Digitized by Google

nischen Kette in Verbindung gesetzt wird, steht die andere Schraube f' im Zusammenhange mit einer Säule L, welche einen zweiarmigen Hebel trägt. Das eine Ende dieses Hebels, berührt mit einer Spitze die Oberfläche vom Quecksilber M, nach welchem die Elektricität des anderen Poles geleitet ist, auf der anderen Seite befindet sich aber eine kleine Platte aus weichem Eisen, etwas oberhalb vom Ende der Eisenstäbe, welche im Innern der Rolle liegen. Sobald nun der Strom eintritt, so werden die Drähte magnetisch und ziehen die Eisenplatte am Hebel an, wodurch die Spitze aus dem Quecksilber ausgehoben und auf diese Weise der Strom unterbrochen wird. Die Eisenstäbe verlieren sofort wieder ihren Magnetismus und halten die Eisenplatte nicht mehr, sodaß

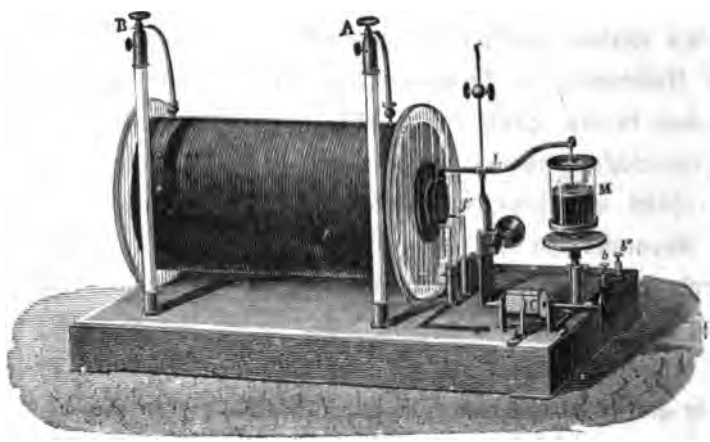


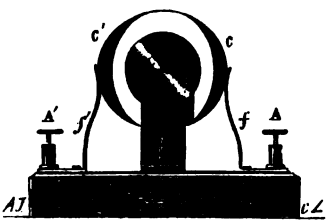
Fig. 429. Ruhmkorff'scher Inductionsapparat.

nun der Hebel durch eine kleine Feder, die in der Zeichnung nicht mit angegeben ist, in seine vorige Lage zurückkehrt und den Strom wieder schließt, worauf das vorige Spiel von Neuem beginnt. In dieser Weise ist es möglich zu bewirken, daß die Inductionsströme mit sehr großer Geschwindigkeit aufeinander folgen.

Nähert man die Drähte, welche mit den Enden der Inductionsspirale in Verbindung stehen, bis auf kurze Entfernungen, so springen zwischen ihnen Funken so schnell nach einander über, daß es den Schein hat, als wäre ein beständig leuchtender Strom vorhanden. Merkwürdig ist, daß hierbei nur die Oeffnungsströme stark genug sind, um den Zwischenraum zu überspringen, während die Schließungsströme keine Wirkung hervorbringen. Mit den zuerst construirten Apparaten erhielt man Funken

Digitized by Google

von höchstens 8mm Länge: als man aber die beiden Enden der Inductionsspirale mit den beiden Belegen einer Leydener Flasche oder Franklin'schen Tafel in Verbindung setzte, so wurde die Wirkung wesentlich verstärkt. Ruhmkorff hat selbst einen Inductionsapparat construirt, bei welchem der Draht der äußeren Spirale eine Länge von 100 Kilometer besaß, und erhielt mit ihm Funken von 50cm Länge: er hat mit demselben Glasblöcke von 1dm Dicke durchbohrt. Jamin hat mit vier vereinigten Rollen, bei denen die Ströme durch je zwei Bunsen'schen Elementen erzeugt wurden, eine Batterie von 120 Leydener Flaschen geladen und durch deren Entladung Drähte aus Eisen, Silber und Kupfer von mehr als 1m Länge geschmolzen und verflüchtigt.



Es erübrigt nun noch zu erwähnen, wie die Richtung eines Stromes mit Leichtigkeit umgeändert werden kann, und wir wollen zu diesem Zwecke die Einrichtung des Commutators (Fig. 430) kennen lernen, den Ruhmkorff an seiner Maschine bei C (Fig. 429) angebracht hat. Wenn auch bei anderen Maschinen, wie z. B. bei der magneto-elektrischen Rotationsmaschine, der Commutator eine etwas andere Gestalt besitzt, so ist doch das Princip dasselbe und es mag daher die Beschreibung des einen Apparates genügen. Der Ruhmkorff'sche Commutator besteht aus einem Holzcylinder, dessen Oberfläche mit zwei Kupferplatten CC' bedeckt ist, welche in der Mitte dick sind, nach dem Rande zu aber immer dünner werden und durch breite Zwischenräume von einander getrennt sind. An diese Kupferplatten legen sich zwei Federn f und f' an, wenn der Cylinder so gestellt ist, daß die dicken Seiten der Platten nach den Federn zu liegen: dreht man dagegen den Cylinder um 90°, so berühren ihn die Federn gar nicht, oder sie treffen auf die Zwischenräume zwischen den Kupferplatten, sodaß auf alle Fälle die Leitung unterbrochen ist. Die Federn f und f' sind durch die Schrauben A und A' mit den Polen der galvanischen Kette in Ver-

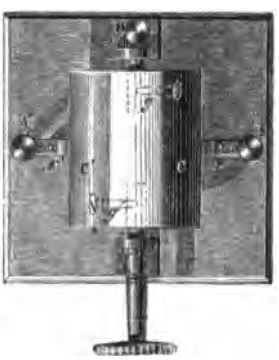


Fig. 430. Commutator an der Ruhmkorff'schen Maschine.

Digitized by Google

bindung gesetzt: die Platte C steht durch die Schraube g mit dem einen Zapfen des Cylinders und dadurch mit dem Knopfe D, die Platte C' durch die Schraube g' mit dem Knopfe D' in Verbindung; der weitere Leitungsdraht ist bei D und D' eingeschraubt. Tritt nun der Strom z. B. bei A ein, so wird er bei der Stellung, welche der Apparat auf der Zeichnung besitzt, durch die Platte C und die Schraube g nach D übergehen: er kehrt dann bei D' zurück und wandert durch die Platte C' nach A'. Dreht man den Cylinder um 180°, so kommt A durch die Platte C' mit D' in Verbindung und geht daher im Leitungsdrahte den umgekehrten Weg.

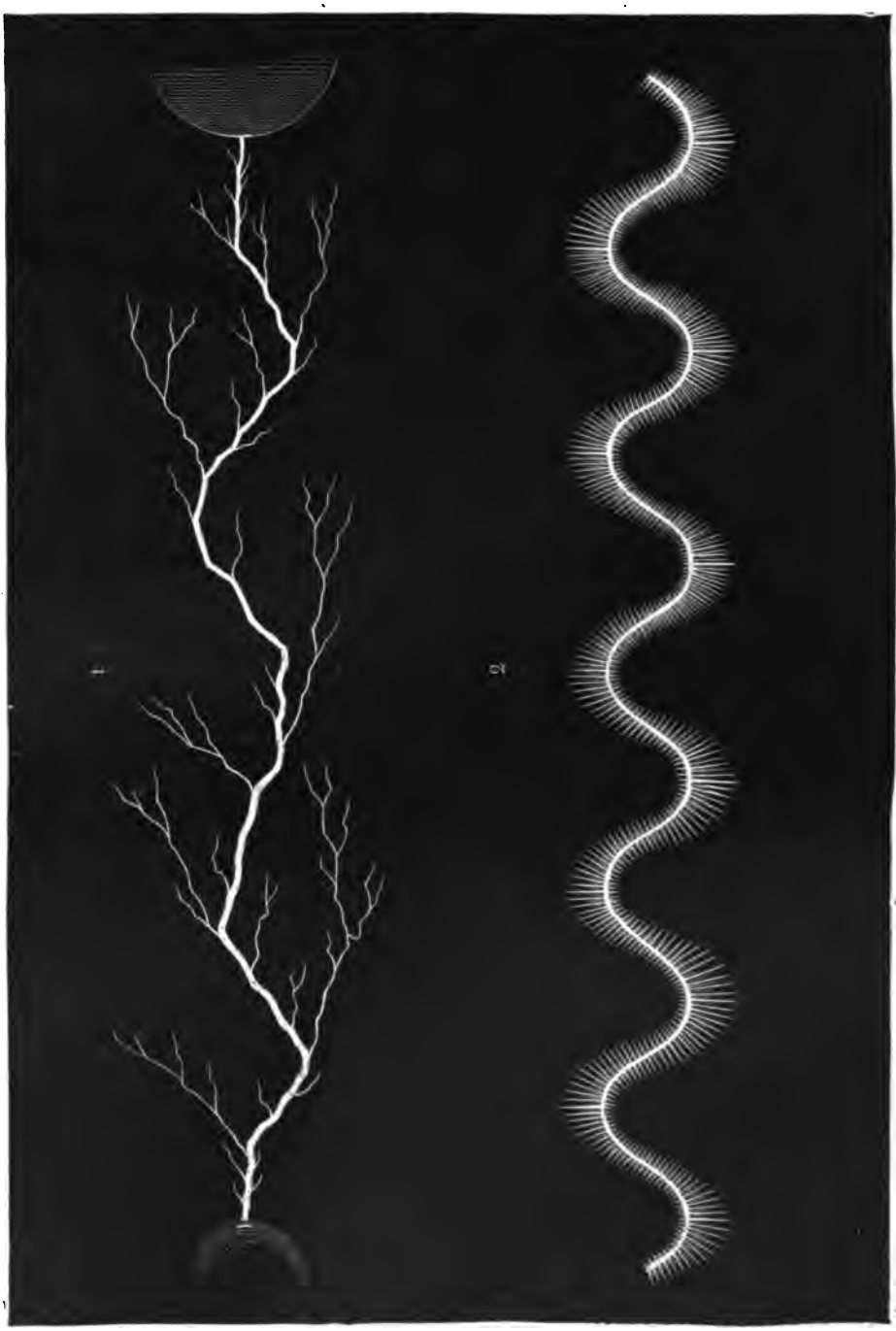
Sechstes Kapitel.

Das elektrische Licht.

§ 1. Funken bei der Entladung der statischen Elektricität.

Von dem schwachen Funken an, welchen man bemerkt, wenn man im Dunkeln den Finger der Glasstange nähert, die man mit Seide gerieben hat, bis zu den langen und glänzenden Feuerstrahlen, welche von den Conductoren starker Maschinen überspringen, oder bis zu dem blendenden Lichte des Volta'schen Bogen, ist gewiß ein gewaltiger Abstand und dennoch ist es eine und dieselbe Erscheinung, mit der man es in allen diesen Fällen zu thun hat und die weiter mit noch größerer Schönheit und zertrümmernder Gewalt bei den Gewitterwolken auftritt. Fragen wir nach dem Grunde dieser Erscheinung, so finden wir, daß sie sich überall da zeigt, wo zwei Körper, die mit den entgegengesetzten Elektricitäten geladen sind, einander gegenübertreten und durch einen isolirenden Körper, etwa durch Luft, von einander getrennt sind. Indem das Streben der beiden Elektricitäten, sich miteinander zu vereinigen, um den neutralen Zustand wieder herzustellen, die Hindernisse überwindet, welche die Isolatoren ihm entgegensetzen, verwandelt sich die lebendige Kraft der Elektricität in Wärme und in Licht und dieses letztere zeigt sich als der elektrische Funke in seinen verschiedenen Formen. Diese verschiedenen Formen, welche der elektrische Funke annimmt, wenn er entweder durch die Entladung einer Batterie, oder durch einen anhaltenden galvanischen

Digitized by Google



Verästelter und gebrochener Funken nach Van Marum.

Digitized by Google

LIBRARY
OF THE
UNIVERSITY
OF
CALIFORNIA

Digitized by Google

Strom oder endlich durch Inductionsströme erzeugt wird, wollen wir jetzt einer genaueren Betrachtung unterwerfen.

Will man die Gestalt der Funken untersuchen, welche vom Conductor einer etwas größeren gewöhnlichen Elektrisirmaschine überspringen, so benutzt man dazu metallene Kugeln oder Scheiben, die man durch eine Kette mit dem Reibzeuge in Verbindung setzt und mittels eines isolirenden Handgriffes dem Conductor gegenüber hält. Nähert man die Scheibe dem Conductor auf sehr kurze Entfernung, so scheint es, als ob ein ununterbrochener Lichtstrom von sehr großem Glanze beständig in gerader Linie vom Conductor zu der Scheibe überspränge. Stellt man aber einen Spiegel auf, welcher sich ziemlich schnell dreht, so löst sich das Spiegelbild in lauter einzelne Lichtpunkte auf: man muß hieraus schließen, daß auch die Entladung aus lauter einzelnen Funken besteht, welche so schnell aufeinander folgen, daß sie unserem Auge als zusammenhängender Lichtstrom erscheinen. Vergrößert man die Entfernung ein wenig, so sieht man, einen Lichtstreifen, der in seiner Mitte etwas dünner ist, als an den Enden; zugleich auch läßt die Häufigkeit der Entladungen etwas nach, sodaß man sieht, daß einzelne Schläge auf einander folgen (Fig. 431). Bei noch größerer Entfernung tritt an Stelle der geraden Linie eine gebrochene oder ausgebogene Linie, gleich als ob die Elektricität an verschiedenen Stellen der Luft auch auf verschiedenen Widerstand stieße. Endlich zeigen sich bei größerem Abstande noch vielfache Veräſtelungen des Funkens, oder man sieht von ihm auch eine Menge feiner Strahlen ausgehen, durch welche seine Breite scheinbar vergrößert wird: so stellt Tafel XVI einen veräſtelten und einen ausgebogenen Funken dar, wie ihn Van Marum bei seiner großen Elektrisirmaschine beobachtet und abgebildet hat. Man sieht, daß diese Funken den Uebergang bilden von dem geradlinigen Funken zu den elektrischen Strahlenbüscheln.

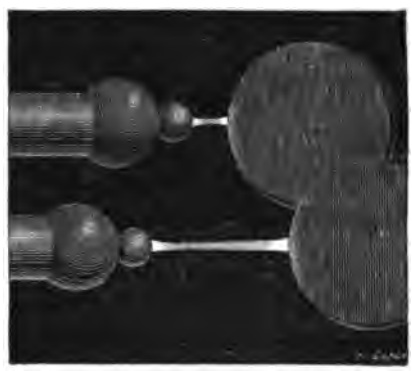


Fig. 431. Funken aus dem Conductor einer Elektrisirmaschine.

Um diese letzte Form des elektrischen Lichtes, das von den Conductoren

Digitized by Google

der Elektrisirmaschine ausgeht, zu erhalten, stellt man die Metalltafel in solcher Entfernung von einer Spitze am Conductor auf, daß keine Funken mehr zu ihr überspringen. Man sieht dann, wie von dem Conductor eine Art Lichtbaum ausgeht, welcher mit seinem Stamme an der Maschine haftet, während eine nicht zählbare Menge von Aesten nach

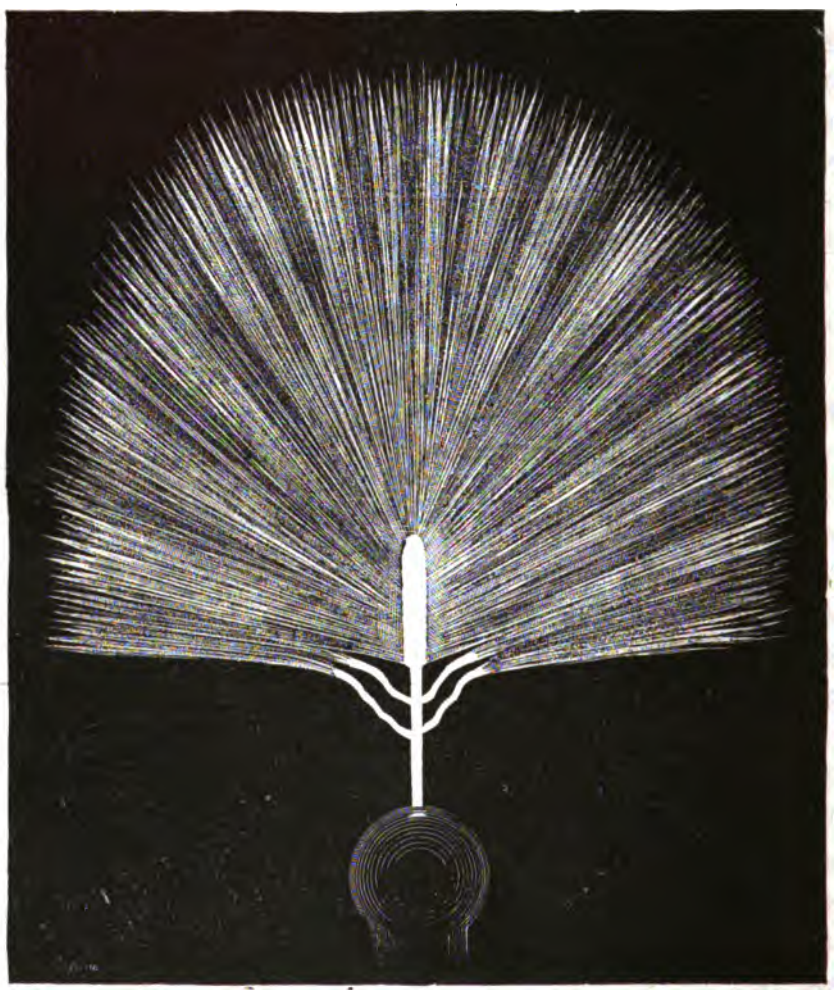


Fig. 432. Elektrisches Strahlenbündel nach Van Marum.

der Metallscheibe sich verzweigen: in Fig. 432 geben wir die Abbildung eines Büschels von elektrischem Lichte ebenfalls nach Van Marum. Als dieses Büschel beobachtet wurde, war der Conductor mit positiver Elektricität geladen; läßt man dagegen negative Elektricität von ihm ausströmen, so enthält das Büschel niemals so viele Strahlen, weil die

Digitized by Google

negative Elektricität eine viel stärkere Spannung annehmen muß, ehe sie sich entladet. Stellt man daher einem positiven Conductor einen Knopf gegenüber, der durch Vertheilung negativ elektrisch wird, und läßt man zwischen beiden Elektricität überströmen, so bildet sich ein Büschel von der Form, wie sie in Fig. 433 dargestellt ist, in welcher deutlich zu erkennen ist, wie die Strahlung von der positiven Seite viel intensiver erfolgt, als von der negativen.

Fig. 433. Positives und negatives Lichtbüschel.

Das Licht bei der Entladung der Elektricität läßt sich nicht nur in der Luft und anderen Gasen wahrnehmen, sondern auch in Flüssigkeiten, welche die Elektricität schlecht leiten: seine Erscheinung, d. h. die Gestalt und Farbe der Blitze, ist je nach dem Mittel verschieden, und wenn die Entladung in einem Gase erfolgt, so ändert sich die Erscheinung auch nach dem Drucke, dem das Gas unterworfen ist. In der Luft bei gewöhnlichem Drucke ist der Funke, wie wir gesehen haben, glänzend weiß; im Stickstoff hat er nach Van Marum, welcher über diesen Gegenstand viele Versuche angestellt hat, blaurothe Färbung, ist dagegen im Sauerstoffe außerordentlich weiß, im Wasserstoffe lila; in Kohlensäure erscheint der Funke grünlich, in Chlorwasserstoffsäure aber wieder weiß. Der Stamm des positiven Lichtbüschels ist in der Luft blauroth, während die Strahlen selbst weiß erscheinen, in anderen Gasen ändert sich auch die Färbung der Büschel, welche z. B. im Wasserstoffe und Leuchtgase grünlich gefärbt erscheinen.

Fig. 434. Leuchten einer Barometerröhre.

Füllt man eine gebogene Glasröhre, deren Schenkel mindestens je

Digitized by Google

77 cm lang sind, mit Quecksilber, kehrt man dieselbe darauf um, und taucht man sie mit ihren unteren Enden in zwei Gefäße ein, welche ebenfalls Quecksilber enthalten, so entsteht hierdurch ein doppeltes Barometer, und in der Biegung der Röhre wird sich ein luftleerer Raum befinden, der nur wenige Quecksilberdämpfe enthält. Leitet man das Quecksilber des einen Gefäßes zur Erde ab, und läßt man in das andere Gefäß durch einen Draht einen Funken überspringen, so sieht man in demselben Augenblicke den ganzen leeren Raum des Barometers mit

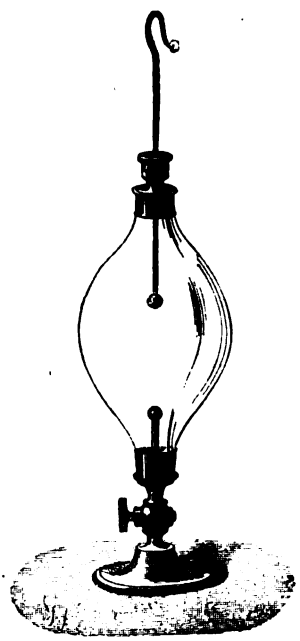


Fig. 435. Elektrisches Ei.

Fig. 436. Elektrisches Licht in verdünnter Luft.

grünlichem Scheine gleichmäßig leuchten (Fig. 434). Um nun weiter zu untersuchen, ob auch in anderen verdünnten Luftarten die Elektricität ohne Funken übergehe, wendet man Glasballons an, in welchen die Luft verdünnt werden kann, und in welche von oben und unten Messingstäbe mit Kugeln hineinreichen, die man einander beliebig nähern kann. Man bezeichnete einen solchen Apparat als ein elektrisches Ei (Fig. 435). Der Fuß dieser Vorrichtung enthält eine Röhre, die sich durch einen Hahn abschließen läßt und auf eine Luftpumpe aufgeschraubt werden kann,

Digitized by Google

sodaß sich die Luft im Innern verdünnen oder auch durch andere Gasarten ersetzen läßt. Ist das Ei mit Luft von gewöhnlichem Drucke erfüllt, so schlägt der Funke über in der Weise, wie wir es früher geschildert haben: in dem Grade aber, wie die Luft verdünnt wird, ändert sich der Anblick der Erscheinung, und wenn der Druck bis auf etwa 60^{mm} herabgesunken ist, so erscheint an Stelle des Funken eine Garbe von rothen Streifen, die von der positiv elektrischen Kugel ausgeht (Fig. 436). Eine Menge leuchtender Bänder von purpurrother Farbe zerstreuen sich durch den ganzen Hohlraum, indem einige längs der Außenwand verlaufen, andere dagegen sich nach der negativ elektrischen Kugel hin wieder vereinigen, welch' letztere von einer dünnen Schicht violetten Lichtes überzogen ist. Sinkt der Druck auf einige Millimeter herab, so vereinigen sich diese Bänder zu einem spindelförmigen Lichtbüschel.

§ 2. Der Volta'sche Bogen.

Läßt man zwischen den Poldrähten einer starken galvanischen Batterie die Elektricität überspringen, so zeigen sich Funken, welche einen ähnlichen Anblick gewähren, wie die Funken bei der Entladung der statischen Elektricität: nähert man die Poldrähte bis auf genügend kleine Entfernungen, so scheint ein ununterbrochener Lichtstrom überzufließen, der besonders glänzend ist, wenn die Enden der Poldrähte mit Kohlenspitzen versehen sind, zwischen denen die Elektricität überfließt. Man erhält dann die glänzende Erscheinung, die man mit dem Namen des Volta'schen Bogen oder des elektrischen Kohlenlichtes bezeichnet, und auf deren Beschreibung wir jetzt etwas näher eingehen wollen.

Hat man die Kohlenspitzen an den Poldrähten einer galvanischen Batterie oder, was noch günstiger ist, eines Inductionsapparates, befestigt, so muß man sie zuerst mit einander in Berührung bringen, damit der elektrische Strom überhaupt in Fluß gerathe: ist der Strom einmal im Gange, ist also einmal der Widerstand der Luft überwunden worden, so kann man die Spitzen ziemlich weit von einander entfernen, ohne daß der Strom aufhört, und man erhält dann ein Licht von außerordentlich großer Intensität. Davy benutzte, um dieses Licht zu erzeugen, eine Säule von 2000 Elementen, deren jedes eine Oberfläche von 4 Quadratdecimeter hatte: nachdem er die Kohlenspitzen bis auf ein halbes Millimeter genähert hatte, zeigte sich das Licht und hielt ununterbrochen

Digitized by Google

an, bis er sie 11cm von einander entfernt hatte. Es breitete sich dann zwischen den beiden Elektroden ein Lichtbogen aus, welcher nach oben etwas erhaben war und so stark glänzte, daß das Auge sein Licht kaum ertragen konnte. Bringt man die Kohlenspitzen in den luftleeren Raum, so ist die Erscheinung noch glänzender und der Bogen noch länger, sodaß Davy die Kohlenspitzen bis auf 18cm von einander entfernen konnte. Außer dem hellen Lichte entwickelt der Volta'sche Bogen auch noch eine Temperatur von sehr bedeutender Höhe, sodaß in ihm die Metalle schmelzen, wie Wachs in einer Kerzenflamme. Indem Despretz erst eine Säule von 600 Elementen, später aber kräftige Inductionsapparate anwendete, hat er die hartflüssigen Metalle geschmolzen und verflüchtigt, und die Oxyde des Zinkes und des Eisen, wie auch Kalk, Magnesia und Aluminia reducirt. Als er auch Graphit verflüchtigte, so setzte sich an den Elektroden ein feiner Staub ab, welcher sich unter dem Mikroskope als krystallisirt zeigte, indem die einzelnen Theile die Form von Octaëdern besaßen: mit diesem Staube konnte man Rubine poliren, woraus man schloß, daß der Graphit, welcher ebenso wie der Diamant, aus reinem Kohlenstoff besteht, unter dem Einfluß der ungeheuren Hitze des Bogens krystallinisch geworden ist und sich in sehr kleine Diamanten verwandelt hat.

Ueber die Lichtstärke des Volta'schen Bogens haben Fizeau und Foucault Versuche angestellt und gefunden, daß das elektrische Kohlenlicht bei Anwendung einer Batterie von 92 Bunsen'schen Elementen, welche in zwei Reihen neben einander eingeschaltet waren, ungefähr 50 mal so stark ist, als das Drummond'sche Kalklicht, und daß es mehr als den dritten Theil des Sonnenlichtes beträgt. Während der Strom zwischen den Kohlen übergeht, werden von jeder derselben sehr feine Theilchen abgerissen und nach der anderen hinübergeführt: diese Uebertragung des Stoffes erfolgt aber reichlicher vom positiven nach dem negativen Pole, sodaß sich die Spitzen nicht gleichmäßig abnutzen, sondern die negative auf Kosten der positiven wächst. Den Anblick, den die Kohlenspitzen gewähren, zeigt Fig. 437 nach einer Abbildung, welche Le Roux entworfen hat, der sich über diese Erscheinung folgendermaßen ausspricht:

„Wollte man direct untersuchen, was im Volta'schen Bogen vorgeht, so müßte man große Vorsichtsmaßregeln anwenden um das Auge gegen die ungeheure Intensität des Lichtes zu schützen; aber diese Intensität

Digitized by Google

selbst erlaubt es uns, die kleinsten Einzelheiten der Kohlenoberfläche einer ganzen Versammlung gleichzeitig zur Anschauung zu bringen. Man braucht nur zwischen den Kohlenspitzen und einem Schirme eine Linse von geeigneter Brennweite aufzustellen, und man wird auf dem Schirme das Bild der Kohle in vielleicht hundertfacher Vergrößerung erblicken; in dieser Projection lassen sich alle Einzelheiten der Erscheinung ohne An=

Fig. 437. Volta'scher Bogen.

strengung verfolgen. Projicirt man das Bild von Kohlenspitzen, zwischen denen der constante Strom einer Bunsen'schen Batterie überfließt, so sieht man, daß die eine Kohle schneller ihre Gestalt ändert als die andere; es ist dies die Kohle am positiven Pole, die also mit der Kohle des letzten Bunsen'schen Elementes in Verbindung steht; wenn dieselbe weniger spitz erscheint als die andere, so ist der Grund hierfür, daß sie an Stoff

Digitized by Google

verliert, der zu der anderen hinüberwandert; kehren wir die Richtung des Stromes um, so sehen wir, wie die Kohle, die soeben noch stumpf war, sich zuspitzt, während die andere sich abstumpft; außerdem lösen sich von Zeit zu Zeit größere Massen ab, durchwandern den Raum in Form von kleinen glühenden Kugeln und geben die Richtung an in der die Strömung erfolgt. Hier und da sieht man an der Oberfläche der Kohlen kleine Kugeln, welche sieden: es sind dies Kugeln von geschmolzener Kieselerde; es ist auffällig, daß diese Kugeln nicht an den Punkten erscheinen, wo die Temperatur am höchsten ist: sie sind bereits verflüchtigt, bevor die Abnutzung der Kohlen sie erreicht hat. Trifft man auf eine etwas unreine Ader in den Kohlen, so zeigt sich eine zu beträchtliche Menge dieser Kugeln von Kieselerde und der Glanz des Lichtes nimmt etwas ab; bläst man schwach zwischen den Kohlen hindurch, so lenkt der Luftstrom die Flamme ab und zeigt uns, wie sich dieselbe entwickelt. Ist man bei Stellen angelangt, wo die Reinheit der Kohle nichts zu wünschen übrig läßt, so sieht man den Lichtbogen sich in großer Ruhe entwickeln und in großer Regelmäßigkeit verlaufen. Das milde bläuliche Licht des Bogens bildet dann einen starken Gegensatz zu dem blendenden Weiß der Oberfläche der Kohle; der eigentliche Bogen bildet gewissermaßen einen abgestumpften Kegel, der in seinem mittleren Theile etwas angeschwollen ist und mit seinen Grundflächen auf den Kohlenspitzen aufsitzt; diese Grundflächen sind die Stellen, wo das Licht am stärksten leuchtet, wo die Temperatur am höchsten ist, und wo die Molecüle auftreffen, die durch den Strom übergeführt werden."

Läßt man Inductionsströme einen Raum durchwandern, welcher mit sehr verdünnten Gasen oder Dämpfen erfüllt ist, so zeigen sich Lichterscheinungen, die sehr merkwürdige Eigenschaften besitzen. Verdünnt man die Luft in einem elektrischen Ei, sodaß ihr Druck nur noch 2 oder 3 mm beträgt und setzt man die beiden Drähte in Verbindung mit den Enden des Drahtes eines Ruhmkorff'schen Inductionsapparates, so sieht man sofort eine prachtvolle Lichtgarbe von schön rother Farbe von der oberen positiven Kugel zur negativen überspringen, während die negative Kugel und der Draht, an dem sie befestigt ist, mit einer Schicht von röthlichblauem Lichte bedeckt sind. Kehrt man die Richtung des Stromes um, so erscheint auch sofort das Lichtbüschel an der unteren, die Schicht an der oberen Kugel (Fig. 438). Hat man in dem Ballon, bevor

Digitized by Google

Verlag v. Paul Frohberg, Leipzig.

ELECTRISCHES LICHT

IN VERDÜNNTEN GASEN

1 Getheilter Lichtbüschel in Alkoholdampfe. 2 Phosphorescenz des Schwefelcalcium. 3 Streifiges Licht in einer Geisler'schen Rohre.

Digitized by Google

LIBRARY
OF THE
UNIVERSITY
OF

Digitized by Google

man die Luft verdünnt Dämpfe verschiedener Stoffe, wie Alkohol, Phosphor oder Terpentinöl, eingeleitet, so zeigt das elektrische Licht eine merkwürdige Beschaffenheit, die fast gleichzeitig von Ruhmkorff und Grove aufgefunden wurde: in dem rothen Lichte des Büschels zeigen sich nämlich sehr schmale dunkle Querschichten, sodaß das Licht abwechselnd aus hellen oder dunkeln Schichten besteht. In der Mitte zeigen sich die Streifen geradlinig, biegen sich aber von da an gerechnet immer stärker um, indem sie ihre hohle Seite den Kugeln zuwenden. Man hat seit-

Fig. 438. Lichtbüschel in verdünnter Luft durch einen Inductionsstrom.

Fig. 439. Gestreiftes Licht in verdünnten Dämpfen.

dem den Gefäßen, welche die verdünnten Dämpfe enthalten, in denen sich das elektrische Licht mit seinen Streifungen zeigt, verschiedene Formen gegeben und besonders hat Geißler mancherlei Röhren verfertigt, in denen sich diese Erscheinungen sehr schön darstellen. Auf Tafel XVII sind einige solche Geißler'schen Röhren abgebildet, bei denen die Schönheit der Lichteffecte noch durch die Phosphorescenz erhöht wird, welche das elektrische Licht im Uranglase, im Strontium und Calcium und im schwefelsauren Chinin hervorruft.

Digitized by Google

Sechstes Buch.

Die Meteore.

§ 1. Optische Erscheinungen. — Die Luftspiegelung. — Der Regenbogen.

Alle Erscheinungen, welche wir bisher betrachtet haben und deren Gesetze die Wissenschaft uns hat allmählich erkennen lassen, treten in der freien Natur vor aller Augen sichtbar ein, und zwar in einem viel großartigeren Maßstabe, als im Versuchszimmer der Physiker. Allein, während der Physiker die Erscheinungen einzeln und in möglichster Reinheit darstellen muß, damit er sie analysiren und in bestimmte Kategorien einreihen kann, um aus ihnen schließlich ein zusammenhängendes System zu bilden, so bestehen in der Natur die Erscheinungen der Schwere, des Lichtes, der Wärme, des Schalles, der Elektricität neben einander, beeinflussen sich gegenseitig, hindern sich und ändern auf tausenderlei Weise einander ab: aus diesen unzähligen Thätigkeiten entspringen die Gegensätze und die harmonischen Uebereinstimmungen, welche die physische Welt dem Künstler ebensogut darbietet, wie dem Gelehrten.

Betrachtet man die physikalischen Erscheinungen der freien Natur in ihrer Gesammtheit, und untersucht man ihre Entstehung, ihre Aufeinanderfolge und ihren regelmäßigen Wechsel, so bezeichnet man sie mit dem Namen der Meteore und nennt die Wissenschaft, welche von ihnen handelt, Meteorologie: dieselbe muß sich nothwendig an die Physik anschließen, ohne welche sie die einzelnen Thatsachen nicht erklären könnte; sie ist streng genommen nur eine Anwendung der Physik, welche sich aber, wenigstens zum großen Theil, der selbständigen Thätigkeit des Menschen entzieht. Es würde nicht möglich sein, diese Wissenschaft in

Digitized by Google

Luftſpiegelung in der afrikaniſchen Wüſte.

Digitized by Google

LIBRARY
OF THE
UNIVERSITY
OF
CALIFORNIA

Digitized by Google

irgend erschöpfender Weise hier zu behandeln: wir wollen daher nur zeigen, wie die Meteore, deren Wirkungen uns am bekanntesten sind, sich an die Erscheinungen anschließen, welche wir in den vorhergehenden Büchern untersucht haben, und dabei nachweisen, daß sie denselben Gesetzen unterworfen sind. Wir beschränken uns auf einige Lichterscheinungen im Luftkreise, nämlich die Luftspiegelungen und den Regenbogen, auf die Beschreibung der wässerigen Niederschläge als Wolken und Nebel, Thau, Regen und Schnee, die durch die Aenderung der Temperatur und des Luftdruckes sich aus dem in der Atmosphäre gelösten Wasserdampfe bilden, und auf die Wirkungen der atmosphärischen Elektricität, nämlich Blitz und Donner und die elektro-magnetische Erscheinung des Nordlichtes.

Die Brechung der Lichtstrahlen, welche entweder alle Schichten der Atmosphäre oder wenigstens einige derselben zu durchlaufen haben, bringt mehrere Erscheinungen hervor, unter denen wir bereits die scheinbare Erhebung der Gegenstände über ihre wirkliche Lage oder die atmosphärische Strahlenbrechung besprochen haben. Derselben Ursache verdankt auch die Luftspiegelung oder Fata Morgana (Tafel XVIII) ihre Entstehung, welche man besonders an der Oberfläche der sandigen Ebenen beobachtet, wenn der Boden durch die Sonnenstrahlen stark erhitzt ist. Der Reisende, welcher diese Ebenen durchwandert, sieht die Gegenstände, welche sich über den Boden erheben, als wären sie durch eine Wasserfläche gespiegelt, und hierbei ist die Täuschung so stark, daß diejenigen, welche zum ersten Male Zeugen dieser Erscheinung sind, ganz sicher an die wirkliche Existenz eines Sees glauben, dessen Gewässer sich am Horizonte ausbreitet. Die Soldaten der französischen Expedition nach Aegypten haben sich zu wiederholten Malen durch diesen trügerischen Schein täuschen lassen: von Anstrengungen und Durst erschöpft, sahen sie die Ufer dieses Sees, den sie so sehnlich herbeiwünschten, in demselben Maße fliehen, als sie sich ihm näherten, und empfanden dabei dieselbe Qual, die einst dem Tantalus auferlegt war, unter anderer, noch schlimmerer Form. Für diese Erscheinung, welche auch anderwärts als in den Wüsten Afrikas beobachtet worden ist, hat zuerst Monge, einer der Gelehrten, welche die ägyptische Expedition begleiteten, die folgende genügende Erklärung gegeben.

Wenn die Sonnenstrahlen auf die Oberfläche der Sandschichten treffen, so erhitzen sie dieselben sehr stark, während sie die darüber liegenden

Digitized by Google

Luftschichten durchwandern, ohne deren Temperatur wesentlich zu erhöhen, weil die absorbirende Kraft der Gase im Vergleiche mit der der festen Körper außerordentlich gering ist. Allein die Hitze des Bodens theilt sich durch Berührung der tiefsten Luftschicht, und von dieser allmählich den nächst höheren mit. Nun strebt zwar die durch die Wärme ausgedehnte Luft darnach, sich infolge ihres geringeren specifischen Gewichtes zu erheben: allein wenn der Boden eine nahezu horizontale Oberfläche besitzt, und wenn die Atmosphäre recht ruhig ist, so bleibt doch das Gleichgewicht bestehen, und es entstehen nur geringe Strömungen, welche durch einige Ungleichheiten in der Ausdehnung der verschiedenen Theile der unteren Luftschicht bewirkt werden. Die Folge hiervon ist, daß gegen Mittag die Schichten in der Nähe des Erdbodens so geordnet sind, daß

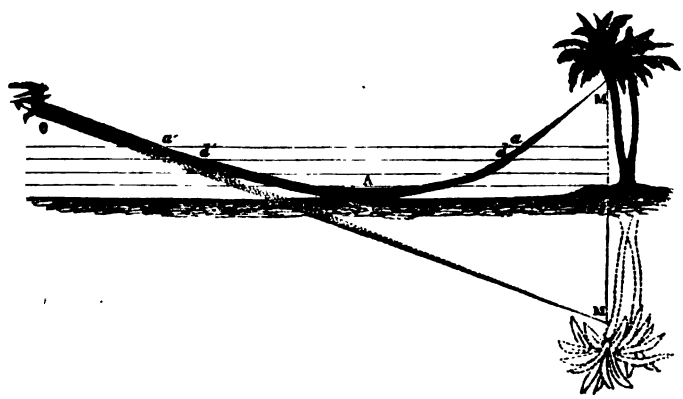


Fig. 440. Erklärung der Luftspiegelung.

ihre Dichtigkeit von Oben nach Unten hin abnimmt. Dringt nun von einem entfernten Punkte M (Fig. 440) schräg gegen den Boden ein Lichtstrahl in die unteren Luftschichten ein, so muß er sich von der senkrechten Richtung immer weiter entfernen, weil er bei a aus einem dichteren Mittel in ein dünneres übergeht und also statt in der Verlängerung von Ma, von a nach d geht. Diese Abweichung wird schließlich so stark, daß bei A der Grenzwinkel für die totale Reflexion erreicht ist, sodaß nun der Strahl nicht tiefer hinabdringen kann, sondern zurückgeworfen wird und in der Richtung über d' und a' in das Auge O gelangt, welches das Spiegelbild von M in M' erblickt. Da alle Strahlen, die von irgend welchen Körpern oder auch vom Himmel ausgehen, in gleicher Weise von der untersten Luftschicht zurückgeworfen werden,

Digitized by Google

so erscheint dieselbe in einiger Entfernung, als wäre sie durch eine etwas unruhige Fläche begrenzt, oder als bestände sie aus einer wirklichen Flüssigkeit.

Die Erscheinung der Luftspiegelung findet auch an der Oberfläche des Meeres statt, wenn das Wasser eine höhere Temperatur besitzt als die Luft, und läßt sich dann auf dieselbe Weise erklären. So wurde sie durch Biot und Mathieu bei Dünkirchen beobachtet, und auch an den Küsten von Sicilien zeigt sie sich nicht selten. Liegen die Luftschichten von ungleicher Temperatur nicht über-, sondern nebeneinander, so findet Spiegelung zur Seite statt, wie sie z. B. Soret und Jurine auf dem Genfer See beobachtet haben, und wie sie überhaupt in Berggegenden bisweilen vorkommt. Endlich hat man auch eine Spiegelung nach Oben hin beobachtet, wenn auf der Erde eine außerordentlich kalte Luftschicht liegt, welche gegen wärmere Luft scharf abgegrenzt ist, wie dies in den Polargegenden bisweilen stattfindet. So sah der Sohn des berühmten Nordpolfahrers und Naturforschers Scoresby eines Tages in der Luft das verkehrte Bild des Schiffes, auf dem sich sein Vater befand, und von welchem ihn ein Sturm getrennt hatte, so deutlich, daß er das Fahrzeug genau erkennen konnte, obgleich das Schiff eigentlich für ihn unter dem Horizonte verborgen war.

Von anderen merkwürdigen Lichterscheinungen in der Atmosphäre, wie dem Regenbogen, den Höfen um Sonne und Mond, den Nebensonnen, die theils durch Strahlenbrechung und Reflexion, theils aber auch durch Interferenz und Beugung des Lichtes entstehen, wollen wir uns nur noch auf die Erklärung des Regenbogens beschränken, wie sie zuerst 1611 von Antonio de Dominis gegeben, später aber durch Descartes und besonders durch Newton vollständig ausgearbeitet wurde. Der Regenbogen zeigt sich bekanntlich in den Regenwolken, die der Sonne gegenüberstehen, und ist entweder einfach, oder es erscheint außerhalb des lebhaft glänzenden Bogens in einiger Entfernung noch ein zweiter, der etwas breiter, aber auch matter ist als der erste. In beiden Bogen erscheinen alle Farben des Sonnenspectrum, und zwar liegt bei dem inneren Bogen das Roth an der Außen-, das Violet an der Innenseite, bei dem secundären Regenbogen aber ist die Reihenfolge der Farben die umgekehrte, sodaß das Roth des zweiten dem Roth des ersten Bogen gegenüber liegt. Die Anordnung der Farben, wie auch die Verhält-

Digitized by Google

nisse der Breite und Entfernung beider Bogen ist aus Tafel XIX ersichtlich.

Um sich über die Bedingungen Rechenschaft zu geben, unter denen diese Erscheinung eintritt, wollen wir den Weg verfolgen, den ein Sonnenstrahl zurücklegt, wenn er auf die Oberfläche eines kugelförmigen Wassertropfens fällt. Sobald ein Lichtstrahl SI (Fig. 441 und 442) die Oberfläche des Regentropfens trifft, so wird er im Einfallspunkte dem Lothe zugebrochen und durchläuft eine Sehne der Kugel. Trifft er auf die innere Fläche des Tropfen, so theilt er sich, indem ein Theil aus dem Tropfen hinaustritt, ein Theil aber reflectirt wird. Dasselbe wiederholt sich, so oft der Strahl die Oberfläche wieder trifft, nur wird bei jeder Reflexion die Intensität des Strahles immer geringer. Kennt man den Winkel, unter welchem der Strahl zuerst auf die Oberfläche traf, und zugleich auch den Brechungsexponenten des Wassers, so kann man leicht den weiteren Weg des Strahles durch Rechnung verfolgen, wenn ein oder zwei oder mehrere Reflexionen stattgefunden haben.

Fig. 441. Weg der Lichtstrahlen im Regentropfen mit einfacher Reflexion.

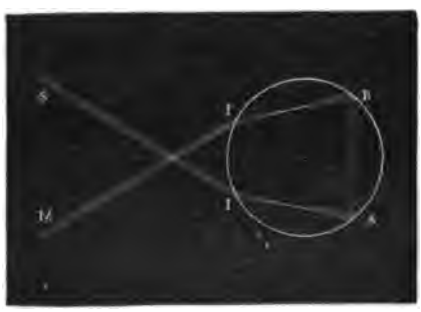


Fig. 442. Weg der Lichtstrahlen im Regentropfen mit doppelter Reflexion.

Tritt an Stelle eines einzelnen Strahles ein ganzes Lichtbündel SI in den Wassertropfen, so werden die einzelnen Strahlen, nachdem sie gebrochen und ein oder mehrere Male reflectirt sind, im Allgemeinen divergiren, und nur bei einem ganz bestimmten Einfallswinkel treten sie auch wieder parallel unter sich aus dem Tropfen aus und wirken auf das Auge, wenn sie auf dasselbe treffen, während sie im anderen Falle diffuses Licht geben. Diese Strahlen,

Digitized by Google

Digitized by Google

BRECHUNG, REFLEXION UND FARBENZERSTREUUNG DES LICHTES

im Regentropfen.

LIBRARY
OF THE
UNIVERSITY
OF
CALIFORNIA

Digitized by Google

welche auch nach der Brechung und Reflexion wieder parallel austreten, nennt man nach Newton wirksame Strahlen. Da nun aber die verschiedenfarbigen Strahlen, aus denen das weiße Sonnenlicht besteht, in verschiedenem Grade brechbar sind, so sind auch die Einfallswinkel, welche den wirksamen Strahlen jeder einfachen Farbe entsprechen, nicht dieselben, weshalb jedes einfallende Strahlenbündel in so viele einzelne Bündel zerlegt wird, als es Spectralfarben giebt. Berechnet man nach dem bekannten Brechungsexponenten für die Farben im Wasser den Einfallswinkel, unter dem bei einfacher Reflexion in A (Fig. 441) im Innern des Tropfen die wirksamen Strahlen der äußersten Farben auf-

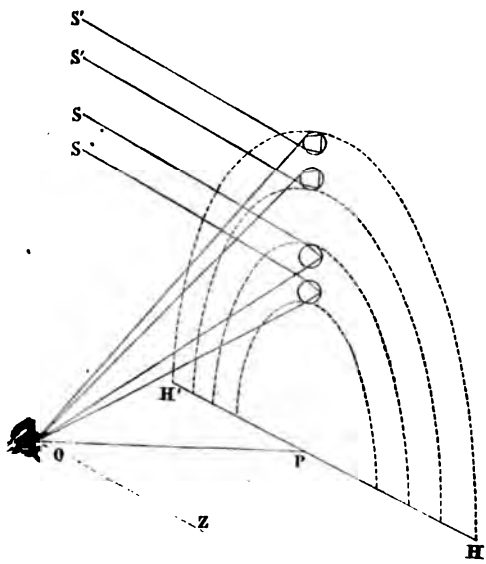


Fig. 443. Entstehung der beiden Regenbogen.

treffen, so findet man für die violetten Strahlen einen Einfallswinkel von 58° 40′ für die rothen 59° 23′: der Winkel aber, den die austretenden Strahlen mit der Richtung der einfallenden Strahlen bildet, beträgt für die violetten Strahlen 40° 17′, für die rothen 42° 2′.

Wird der Strahl im Innern des Tropfen zwei Mal, nämlich bei A und B (Fig. 442), reflectirt, so sind die Einfallswinkel der wirksamen Strahlen für das violette Licht 71° 26′, für das rothe 71° 50′, und die Abweichungen der Strahlen von der ursprünglichen Richtung betragen für das rothe Licht 50° 59′, für das violette 54° 9′.

Aus diesen Betrachtungen geht hervor, daß der Hauptregenbogen

Digitized by Google

durch diejenigen Sonnenstrahlen erzeugt wird, welche im Innern der Regentropfen nur einmal reflectirt werden, daß der zweite Regenbogen aber durch die Strahlen entsteht, welche doppelte Reflexion erleiden. Denken wir uns vom Auge O (Fig. 443) eine Linie OZ parallel zur Richtung der Sonnenstrahlen gezogen, so wird der Beobachter der der Sonne den Rücken kehrt und in einer Richtung Oa blickt, welche mit der Richtung der Sonnenstrahlen den Winkel aOZ bildet, der der Ablenkung der wirksamen violetten Strahlen gleich ist, violettes Licht in sein Auge erhalten, das dem Sonnenstrahle Sa, der nur einmal im Regentropfen reflectirt wird, entstammt: denn wegen des Parallelismus des Strahles Sa und der Linie OZ ist der Winkel aOZ dem Ablenkungswinkel SaO gleich. Zieht man also von O aus eine Linie Oa, unter einem Winkel ZOa, welcher dem Ablenkungswinkel der wirksamen violetten Strahlen bei einfacher Reflexion gleich ist, so wird dieselbe immer auf einen Regentropfen treffen, in welchem ein Sonnenstrahl Sa so gebrochen und einfach reflectirt wird, daß der wirksame violette Strahl gerade in unser Auge gelangt. Ungefähr 2° höher wird dagegen ein Tropfen b liegen, welcher dem Beobachter nur rothes Licht sendet, und zwischen a und b werden in gleicher Weise alle Farbennüancen des Sonnenspectrum, also Indigo, Blau, Grün, Gelb und Orange, liegen. Augenscheinlich wird dasselbe stattfinden in jeder Richtung, welche mit OZ den erwähnten Winkel einschließt; der Beobachter wird daher Streifen von allen diesen Farben sehen, welche sich auf das Himmelsgewölbe in der Form von concentrischen Kreisen projiciren, deren Mittelpunkt auf der Linie OZ, der Sonne diametral gegenüber, liegt. In derselben Weise werden auch die wirksamen rothen Strahlen, welche in den Tropfen doppelt reflectirt sind, das Auge des Beobachters unter einem Winkel von 50° 59′, die violetten unter einem Winkel von 54° 9′ gegen die Linie OZ treffen und es werden auch in diesem Falle die Farben concentrische Ringe bilden, bei denen nur das Roth innen bei b′, das Violet außen bei a′ liegt.

Alle diese Resultate, welche aus der Theorie vorher berechnet waren, sind durch genaue Beobachtungen vielfach bestätigt worden. Befindet sich die Sonne im Horizont, so fällt auch die Linie OZ, und mithin auch der Mittelpunkt der concentrischen Kreise in die Horizontalebene, weshalb wir beim Auf- und Untergange der Sonne die Regenbogen in Form

Digitized by Google

von Halbkreisen erblicken. Je höher die Sonne steht, desto kürzer und flacher ist der Bogen den wir überblicken. Befindet sich der Beobachter auf einem sehr hohen, möglichst freien Standpunkte, etwa auf einer recht isolirten hohen Bergspitze oder noch besser im Luftballon, so kann ihm der Regenbogen als mehr als ein Halbkreis, ja sogar als voller Kreis erscheinen, wenn die Regenwolke ziemlich nahe ist.

Man darf nicht vergessen, daß die Erscheinung des Regenbogens nur von der Stellung des Beobachters zur Sonne und zur Regenwolke abhängt: erblicken daher zwei Personen, die in einer etwas größeren Entfernung von einander stehen, gleichzeitig einen Regenbogen, so ist es nicht derselbe Bogen den sie sehen; denn erblickten sie einen und denselben Bogen, so müßte er für diejenige Person, welche seitwärts steht, die Gestalt eines Ovales oder einer Ellipse annehmen, während man doch den Regenbogen niemals in anderer Gestalt als der eines Kreises gesehen hat. Auch aus der Theorie geht hervor, daß es nicht dieselben Strahlen sein können, welche die Augen verschiedener Beobachter treffen: sobald die Erscheinung sich zeigt, so sieht jeder Beobachter seinen besonderen Regenbogen.

§ 2. Atmosphärische Feuchtigkeit.

Die feuchten Niederschläge der Atmosphäre entstehen durch die Umwandlungen, welche der in der Luft enthaltene Wasserdampf unter dem Einflusse der Aenderungen der Temperatur erleidet: durch seine Verdichtung entstehen Wolken, Nebel, Regen, Schnee, Thau, Reif; sodaß sich also die Feuchtigkeit der Atmosphäre in allen drei Aggregatsformen zeigt: Im luftförmigen Zustande besteht sie in unsichtbarem Wasserdampfe; sinkt die Temperatur, so verdichtet sie sich zu mehr oder weniger feinen Tropfen; tritt endlich noch größere Abkühlung ein, so erstarren diese Tropfen und fallen in Gestalt von weißen Flocken nieder oder hängen sich als feine Krystalle an die Oberfläche des Bodens. Betrachten wir einige der wichtigeren von diesen Umänderungen und sehen wir zu, nach welchen Gesetzen dieselben erfolgen.

Bekanntlich besteht die Luft, die uns umgiebt, aus zwei permanenten Gasen, die mit einander gemischt sind, dem Sauerstoff und dem Stickstoff, zu welchen aber noch veränderliche Mengen von Wasserdampf und

Digitized by Google

Kohlensäure treten. Die Menge des Wasserdampfes, welche in der Luft gelöst sein kann, ist von der Temperatur abhängig, und zwar ist dieselbe um so größer, je höher die Temperatur ist. In der Regel ist aber nicht soviel Wasserdampf in der Luft enthalten, als überhaupt möglich ist: ist dies der Fall, so sagt man, daß die Luft mit Wasserdampf gesättigt ist; im entgegengesetzten Falle aber bezeichnet man das Verhältniß der wirklich vorhandenen Dämpfe zu der Dampfmenge, welche vorhanden sein könnte als den Grad der Feuchtigkeit, und mißt denselben durch gewisse Instrumente, die man mit dem Namen der Hygrometer bezeichnet.

Wir erwähnen unter den Hygrometern zunächst das Haarhygrometer, das von Saussure erfunden ist (Fig. 444). Bei demselben wird die Feuchtigkeit der Luft durch die Ausdehnung eines langen Haares bestimmt, das, wie viele andere organische Substanzen, für den Grad der Feuchtigkeit sehr empfindlich ist. Ein langes Haar, das durch siedenden Schwefeläther von seinem Fette befreit worden ist, wird an seinem oberen Ende fest geklemmt, mit seinem unteren Ende aber um eine Rolle geschlungen und durch ein kleines Gewicht in Spannung erhalten. In feuchter Luft saugt dieses Haar Wasserdämpfe auf und verlängert sich, wodurch sich zugleich die Rolle nach der einen Seite hin umdreht: in trockener Luft verkürzt es sich wieder und dreht die Rolle im entgegengesetzten Sinne; die Bewegungen der Rolle werden durch einen Zeiger, der mit ihr fest verbunden ist, auf einem Theilkreise bemerklich gemacht. Um für die Beurtheilung der Feuchtigkeit einen festen Halt zu haben, bringt man das Instrument zuerst unter eine Glocke, unter welcher die Luft durch Chlorcalcium oder concentrirte Schwefelsäure vollständig ausgetrocknet ist, und bezeichnet den Punkt, auf welchen sich der Zeiger einstellt mit 0°: hierauf bringt man das Instrument unter eine andere Glocke, deren Wände mit destillirtem Wasser benetzt sind und auf deren Boden ebenfalls Wasser ausgegossen ist, und bezeichnet den Punkt, auf welchen jetzt der Zeiger einspielt, mit 100°, den Zwischenraum theilt man aber in 100 Theile. Die Angaben dieses Hygrometers

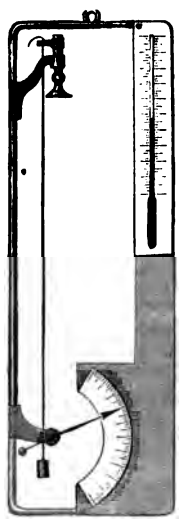


Fig. 444. Haarhygrometer nach Saussure.

Digitized by Google

sind im Ganzen sehr wenig zuverlässig, weil die Aenderung der Länge des Haares durchaus nicht gleichmäßig erfolgt: in sehr trockener Luft z. B. dehnt sich das Haar verhältnißmäßig viel stärker aus, als bei sehr feuchter.

Es ist daher vorzuziehen, daß man andere Hygrometer anwendet, z. B. das von Daniell erfundene, bei welchem man eine blankpolirte Metallkugel abkühlt, indem man in ihr Aetherdämpfe verflüchtigt, und genau beobachtet, bei welcher Temperatur ihre Oberfläche beschlägt. Man kann dann annehmen, daß in der Luft gerade soviel Wasserdämpfe gelöst sind, als bei derjenigen Temperatur höchstens gelöst sein können, bei welcher das Beschlagen erfolgt. Die genauesten Resultate giebt das August'sche Psychrometer: an einem Thermometer, dessen Kugel mit Musselin umwunden ist, welcher mit Wasser befeuchtet wird, liest man ab, um wie viel die Temperatur durch das Verdunsten des Wassers sinkt; je stärker diese Abnahme ist, desto schneller ist die Verdunstung erfolgt, desto trockener ist mithin auch die Luft. Den genauen Werth der Dampfmenge findet man in jedem einzelnen Falle aus Tabellen, die eigens zu diesem Zwecke berechnet worden sind.

Die Dampfmenge, die in der Luft enthalten ist, wächst im Allgemeinen mit der Temperatur, in der Nähe der Meere ist sie größer, als im Innern der Festländer; sie ändert sich sowohl im Laufe des Tages, als auch während des ganzen Jahres, und im Durchschnitte ist die absolute Dampfmenge in den heißen Tages- und Jahreszeiten am größten. Anders verhält es sich mit der relativen Feuchtigkeit, denn dieselbe ist gewöhnlich in der Nacht und während der kalten Jahreszeit möglichst groß, d. h. zu diesen Zeiten ist der Dampfgehalt der Luft seinem Sättigungspunkte am nächsten. Endlich ist auch die Windrichtung von großem Einflusse auf den Dampfgehalt, sodaß z. B. in unseren Gegenden die relative Feuchtigkeit der Luft bei Südwestwind am größten, bei Nordostwind am geringsten ist: für die östlichen Staaten Nordamerika's kehren sich die Verhältnisse um, indem dort das Meer im Osten, das Festland im Westen liegt.

Kühlt sich die Luft soweit ab, daß die vorhandenen Dämpfe nicht mehr alle gelöst bleiben können, so condensiren sie sich zu feinen Tropfen, welche sich an die Oberfläche fester Körper, besonders der Spitzen der Blätter, anhängen und den Thau bilden. Am häufigsten fällt der Thau

Digitized by Google

in wolkenlosen Nächten des Frühlings und des Herbstes: dann strahlt der Erdboden seine Wärme in den Weltenraum hinaus und kühlt sich dabei sehr stark ab, ohne daß sich die Temperatur der höheren Luftschichten in gleichem Maße erniedrigt. In der Nachbarschaft des Erdbodens wird sich daher der Dampf condensiren und besonders an die Gegenstände anhängen, welche die Wärme am leichtesten ausstrahlen, während die höhere Luft vollständig klar bleibt, ohne daß sich in ihr Nebel bildet. Ist der Himmel bedeckt, so wird die Strahlung gehemmt und findet nur zwischen den Wolken und dem Erdboden statt, weshalb sich dann die Temperatur nur wenig erniedrigt: daher thaut es bei bedecktem Himmel weit weniger stark. Sinkt die Temperatur der Nächte unter 0°, so schlagen sich die Dämpfe als sehr feine Eisnadeln nieder und bilden den Reif, der, wenn er sehr stark auftritt, auch Rauchfrost genannt wird.

Findet die Erniedrigung der Temperatur nicht nur in der unmittelbaren Nähe des Erdbodens statt, so bilden sich durch die Condensation der Dämpfe außerordentlich feine Wassertropfen, welche die Durchsichtigkeit der Luft in dem Raume, den sie erfüllen, trüben und den Nebel und die Wolken bilden. Zwischen diesen beiden Formen besteht kein wesentlicher Unterschied: man beschränkt den Namen Nebel gewöhnlich auf diejenigen Wolken, welche sich in der unmittelbaren Nähe des Bodens befinden. Die Wolken verändern beständig ihre Form, nicht allein weil sie vom Winde umgestaltet werden, sondern auch weil sich bald ein Theil der Wasserbläschen wieder in Dampf verwandelt, wenn sie auf eine wärmere Luftschicht treffen, bald aber auch wieder durch neue Condensation die Dichtigkeit der Dunstbläschen größer wird. Haben die einzelnen Tropfen eine gewisse Größe erlangt, so fallen sie auf den Erdboden und bilden den Regen, welcher entweder dadurch entstehen kann, daß in eine dampfreiche Luftschicht ein kälterer Strom eindringt und die Dämpfe condensirt, oder auch dadurch, daß warme und feuchte Luft bei ihrer Wanderung sich abkühlt und die Dämpfe nicht mehr gelöst halten kann. Ist die Temperatur niedrig genug, so zeigt sich an Stelle des Regen der Schnee. Ein sehr merkwürdiges Beispiel für diese Condensation durch Abkühlung ist wiederholt am Straßbnrger Münster beobachtet worden: wenn beim ersten Anbruch des Frühjahrs das hohe Dach dieses Gebäudes mit Schnee bedeckt ist, und nun ein warmer feuchter

Digitized by Google

Eiskrystalle im Schnee, nach Scoresby.

Digitized by Google

LIBRARY
OF THE
UNIVERSITY
OF
CALIFORNIA

Digitized by Google

Wind von Süden her über dasselbe hinwegweht, so kühlt sich die Luft so stark ab, daß sich die Dämpfe zu Schneeflocken verdichten, die auf der Nordseite des Münsters niederfallen, während auf der Südseite klarer Himmel ist.

Die Schneeflocken bestehen aus einer Menge kleiner Eiskrystalle, die mit wunderbarer Symmetrie zu sechszackigen Sternen vereinigt sind, in denen die einzelnen Strahlen und Platten Winkel von 60° oder 120° bilden: eine Menge solcher merkwürdiger Formen hat Scoresby bei seiner Polarreise beobachtet und von ihnen Abbildungen geliefert, von denen Tafel XX eine Nachbildung ist. Sind mehrere Luftschichten von sehr verschiedener Temperatur und sehr wechselndem Feuchtigkeitsgrade übereinander gelagert, so überziehen sich die Schneeflocken, welche durch sie hindurch fallen mit immer neuen Schalen dichten Eises und bilden die

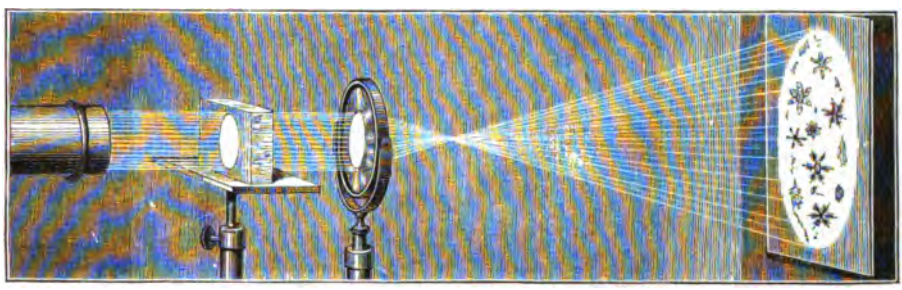


Fig. 445. Krystallinische Structur im Innern eines Eisblockes.

Hagelkörner, welche besonders dann sehr große Dimensionen annehmen, wenn bei sehr großer Hitze und sehr feuchter Luft plötzlich kalte Luftströme eintreten und eine schnelle Condensation bewirken.

Auch die Eismassen, welche bei den niedrigen Temperaturen des Winters unsere Gewässer bedecken, zeigen selbst dann eine ähnliche krystallinische Structur wie die atmosphärischen Niederschläge, wenn sie durchsichtige dicke Blöcke bilden: für das unbewaffnete Auge freilich tritt diese Eigenschaft nicht hervor, Tyndall aber hat sie durch folgenden merkwürdigen Versuch wahrnehmbar gemacht. Läßt man die parallelen Strahlen der Sonne durch einen Eisblock hindurchgehen, so werden die Wärmestrahlen in seinem Innern einzelne Theile des Eises in Wasser verwandeln, diese Verwandlung wird aber ziemlich langsam erfolgen, da das Eis die meisten Wärmestrahlen hindurchläßt, ohne sie zu absorbiren.

Digitized by Google

Stellt man nun eine Linse so auf, daß von den Punkten, wo die Schmelzung beginnt, auf einem Schirme deutliche Bilder entstehen (Fig. 445), so sieht man hier und da sechszackige Sterne erscheinen, deren Ränder mit kleinen Zähnen versehen sind; in der Mitte jedes Sternes aber sieht man einen Fleck, der wie polirtes Silber glänzt (Fig. 446).

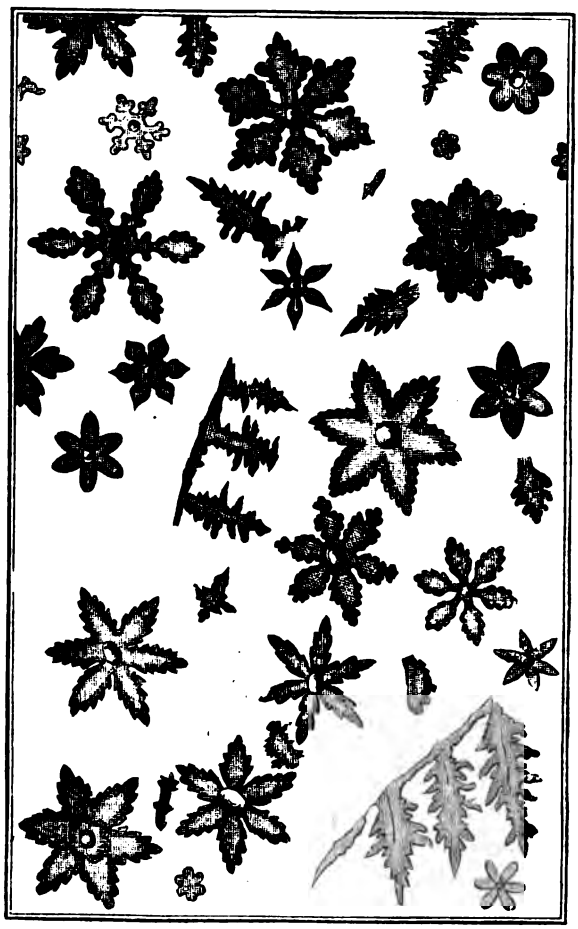


Fig. 446. Eisblumen nach Tyndall.

Tyndall hat nachgewiesen, daß dieser Fleck ein luftleerer Raum ist, der sich dadurch bildet, daß sich das Eis beim Schmelzen zusammenzieht, wie ja auch diese Zusammenziehung bis zur Temperatur von 4° beim Wasser fortdauert.

Alle die Erscheinungen, welche wir in diesem Paragraphen besprochen haben, verdanken ihre Entstehung hauptsächlich dem Wechsel der Tem-

Digitized by Google

peratur: dieses Element hat also für die Meteorologie eine außerordentlich große Bedeutung, sodaß es von der größten Wichtigkeit ist, seinen Wechsel sorgfältig zu beobachten. Welche Einrichtung man am besten den Thermometern giebt, das haben wir früher gesehen; es kommt also nur darauf an, diese Instrumente beständig im Auge zu behalten und ihren Stand ununterbrochen zu verfolgen. Da dies aber nicht ausführbar ist, so begnügt man sich damit, sie regelmäßig zu fest bestimmten Zeiten abzulesen, und stellt außerdem nur noch Instrumente auf, an denen sich erkennen läßt, welches der höchste und welches der niedrigste Stand der Temperatur innerhalb eines bestimmten Zeitraumes gewesen ist. Diese Instrumente, mit denen wir uns jetzt beschäftigen wollen, heißen Maximum- und Minimumthermometer.

Das verbreitetste unter denselben ist der Thermometrograph von Rutherford (Fig. 447), der aus einem Quecksilber- und einem Weingeist-

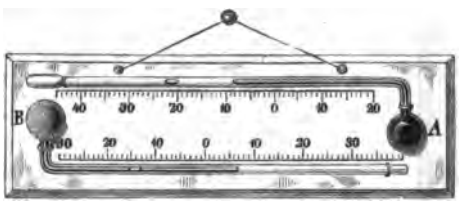


Fig. 447. Thermometrograph von Rutherford.

thermometer besteht, die beide horizontal liegen. Im Innern der Röhre des ersteren liegt ein kleiner Stahlcylinder, welchen das Quecksilber vor sich herschiebt, solange es sich ausdehnt, welcher aber ruhig an seinem Platze liegen bleibt, wenn sich die Temperatur erniedrigt: die Spitze des Cylinders, welche dem Quecksilber zugewendet ist, wird also immer anzeigen, welches der höchste Stand gewesen ist, den dasselbe eingenommen hat. In der Röhre des Weingeistthermometers dagegen liegt ein Glasstäbchen, das vom Weingeist benetzt und mitgeführt wird, wenn sich derselbe zusammenzieht: dehnt er sich dagegen aus, so gleitet er über das Stäbchen hinweg, ohne es weiter zu schieben, sodaß es immer an der Stelle liegen bleibt, bis zu welcher der Weingeist zurückgegangen war, als die Temperatur den niedrigsten Stand hatte. Will man den Apparat zu einer neuen Beobachtung einstellen, so neigt man ihn nach der Seite A, wobei der Eisencylinder auf den Quecksilberspiegel herab-

Digitized by Google

fällt, das Glasstäbchen aber bis an das Ende der Weingeistsäule herabgleitet.

Um die Temperatur in tiefen Bohrlöchern und am Grunde der Meere und Seen zu messen, bedient man sich mit dem besten Erfolge der von Walferdin erfundenen Maximum- und Minimumthermometer (Fig. 448), welche folgendermaßen eingerichtet sind. Das Maximumthermometer besteht aus einem Quecksilberthermometer, das oben in eine feine Spitze ausläuft, welche sich in eine angeschmolzene Glaskugel öffnet. Vor dem Versuche erwärmt man das Instrument, bis die Röhre ganz mit Quecksilber gefüllt ist, kehrt es darauf um, sodaß die Oeffnung der Spitze von dem Quecksilber geschlossen wird, das sich in der angeschmolzenen Kugel befindet, und kühlt es in dieser Stellung bis zu einer Temperatur ab, die sicher tiefer liegt, als die Temperatur, die man messen will, wobei die Röhre immer mit Quecksilber gefüllt bleibt. Nun kehrt man das Instrument wieder um und bringt es an den Ort, an welchem man die Maximaltemperatur beobachten will. Sobald die Temperatur steigt, wird das Quecksilber aus der feineren Spitze ausfließen und beim darauf erfolgenden Abkühlen die Röhre nicht mehr vollständig füllen. Bringt man es hierauf in ein Wasserbad, dessen Temperatur sich durch genaue Thermometer bestimmen läßt, und erwärmt man dasselbe, bis die Quecksilbersäule wieder bis an die Spitze heranreicht, so stimmt die Temperatur des Wasserbades überein mit der höchsten Temperatur, der das Thermometer zuvor ausgesetzt gewesen ist. Bei Walferdin's Minimumthermometer läuft die Röhre nach Unten zu in eine Spitze aus, die Kugel aber enthält außer Quecksilber noch etwas Alkohol. Ehe man eine Beobachtung anstellt, kühlt man den Apparat so ab, daß sich in der Röhre nur noch etwas Quecksilber befindet, kehrt ihn dann um und erwärmt wieder, wodurch eine größere Menge Quecksilber in die Röhre

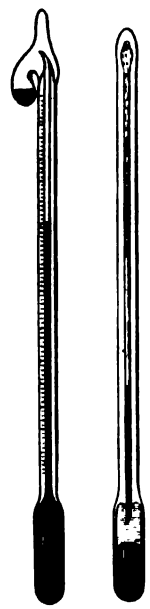


Fig. 448. Maximum- und Minimumthermometer nach Walferdin.

Digitized by Google

eindringt. Stellt man das Thermometer wieder aufrecht, so wird bei sinkender Temperatur Quecksilber aus der Röhre tropfen; steigt dagegen die Temperatur wieder, so dringt an Stelle des Quecksilbers Weingeist in die Röhre ein. Taucht man daher dieses Thermometer wieder in ein Wasserbad, das man allmählich abkühlt, so wird die Temperatur desselben mit der niedrigsten Temperatur der zuvor das Thermometer ausgesetzt war, übereinstimmen, sobald der Quecksilberfaden mit seinem nnteren Ende die Spitze wieder erreicht. Die Messungen mit diesen beiden Instrumenten geben außerordentlich scharfe Temperaturbestimmungen.

Der wechselnde Druck der Luft wird, wie wir im ersten Buche gesehen haben, durch die verschiedenen Einstellungen des Quecksilberspiegels im Barometer angezeigt: der Gründe aber für diesen Wechsel im Drucke giebt es viele, und deshalb ist die Erscheinung, welche durch das Barometer bemerklich gemacht wird, sehr zusammengesetzt. Wäre die Luftsäule, welche auf einem Punkte des Erdbodens lastet, immer in Ruhe, so würde der Druck nur von dem Gewichte der Luft abhängen, aus welcher sie besteht; nur müßte man hierzu noch den Druck rechnen, den der beigemengte Wasserdampf vermöge seiner Elasticität ausübt. Ein solcher Gleichgewichtszustand besteht aber niemals, an keinem Orte der Erde; denn ehe er sich irgendwo hergestellt hat, wird er schon wieder durch die Einwirkung der Sonnenwärme gestört. Durch die Sonnenstrahlen werden im Laufe eines Tages und ebenso während des Wechsels der Jahreszeiten die verschiedenen Punkte der Erdoberfläche und damit auch die Luftschichten, welche auf ihnen ruhen, sehr ungleichmäßig erwärmt. Je beträchtlicher diese wärmende Kraft ist, desto stärker werden die Luftschichten ausgedehnt und desto mehr suchen sie sich vermöge der Verminderung ihrer Dichtigkeit zu erheben. Da aber in demselben Augenblicke die Verhältnisse an verschiedenen Orten, welche mehr oder weniger weit von einander entfernt sind, nicht genau die gleichen sind, so muß das Gleichgewicht nothwendig gestört werden und es wird im Allgemeinen in den oberen Luftschichten ein Strömen von den wärmeren nach den kälteren erfolgen, während sich in der Nähe des Erdbodens die Luft vom kälteren zum wärmeren Ort hin bewegt. Dies ist die Ursache für die Entstehung der Winde. Da die Luft in den kälteren Gegenden viel dichter ist, so wird sich ihr Einströmen in wärmeren Gegenden durch ein Steigen des Barometers bemerklich machen, und ebenso wird ein Ein-

Digitized by Google

strömen der Luft aus wärmeren Gegenden den Stand des Barometers erniedrigen, und diese Aenderungen des Barometerstandes sind schon dann bemerklich, wenn die Strömungen auch erst in den höchsten Luftschichten erfolgen und an der Erdoberfläche noch gar nicht bemerkt werden. Durch das Barometer wird daher eine Aenderung der Windrichtung mit ziemlicher Sicherheit vorausgesagt, und aus diesem Grunde ist jenes Instrument ein Wetterprophet.

Man darf hierbei nicht vergessen, daß die wärmende Kraft der Sonne auch auf den Wasserdampf wirkt, der in der Luft enthalten ist, indem sich seine Elasticität bei steigender Temperatur erhöht: wird daher die Dichtigkeit der Luft geringer, wenn die Temperatur steigt, so wird gleichzeitig die Spannung des Wasserdampfes größer, und dieser Umstand bringt auf das Barometer gerade die entgegengesetzte Wirkung hervor; die Angaben des Barometers belehren uns also nur über den Unterschied der beiden erwähnten Wirkungen. Endlich wirken die Luftströmungen wahrscheinlich in noch ganz anderer Weise auf das Barometer. Verbreitet sich z. B. eine Strömung in der Luft von Oben nach Unten, so wird ihr Einfluß auf das Barometer nicht allein von ihrem Gewichte abhängen, sondern auch von der Geschwindigkeit, mit welcher sich die Gasmasse bewegt, sodaß die Winde, wie Marié-Davy sehr treffend bemerkt, welche selbst durch den Unterschied des Druckes infolge der Verschiedenheit der Temperatur erzeugt werden, wieder eine ähnliche Wirkung hervorbringen, indem sie selbst Verschiedenheit des Druckes erzeugen.

Man hat im Stande des Barometers einen regelmäßigen Gang gefunden, indem man bemerkt hat, daß sich im Mittel die Höhe desselben sowohl nach einer täglichen, als auch nach einer jährlichen Periode ändert; außerdem finden aber auch sehr zahlreiche unregelmäßige Veränderungen statt, welche durch sehr zusammengesetzte Ursachen bewirkt werden. Besonders spielt die herrschende Windrichtung hierbei eine Hauptrolle, und in fast ganz Europa steht das Barometer am höchsten bei den Winden, die aus Norden und Osten wehen, am tiefsten beim Süd- und Westwind.

§ 3. Elektrische und magnetische Meteore. — Das Nordlicht.

Im Jahre 1735 machte Gray auf die Aehnlichkeit aufmerksam, welche zwischen Blitz und Donner bei den Gewittern und dem elektrischen

Digitized by Google

Funken besteht, welcher bei irgend einer Entladung überspringt und zugleich als trockener Schlag hörbar ist. Aber erst Franklin hat durch entscheidende Versuche bewiesen, daß beide Erscheinungen ihrem Wesen nach vollständig übereinstimmen, und im Jahre 1749 machte dieser berühmte Physiker darauf aufmerksam, daß es wohl möglich ist, die Eigenschaften der Metallspitzen zu benutzen, um die Gebäude vor den Angriffen jener zerstörenden Naturkraft zu schützen. Nachdem er alle Aehnlichkeiten zwischen Blitz und elektrischer Entladung, welche von seinen Vorgängern aufgefunden waren, zusammengestellt hatte, führte er den Beweis, daß das Gewitter eine elektrische Erscheinung sei, indem er einen Papierdrachen, den er mit einer Metallspitze versehen hatte, nach der Gewitterwolke aufsteigen ließ. Sobald die Schnur dieses Drachen durch den herabfallenden Regen ein wenig benetzt war, zeigte sich an ihrer Oberfläche Elektricität, welche in Form von Funken übersprang. Als De Romas in Nérac den Versuch Franklin's bei einem nicht sehr starken Gewitter wiederholte, konnte er mit Hülfe eines Entladers aus der Schnur Funken von 4^m Länge ziehen; und Richmann wurde bei ähnlichen Versuchen in Petersburg durch einen solchen Funken getödtet. Sauſſure untersuchte die Gewitterwolken auf ihre Elektricität hin und fand, daß dieselben bald eine positive, bald eine negative Ladung besitzen: nähern sich zwei Wolken mit entgegengesetzter Elektricität, so findet zwischen ihnen ein Ausgleich in Form eines starken Funken, des Blitzes, statt, welcher von einem heftigen Geräusche, dem Donner, begleitet ist. Nähert sich eine Wolke dem Erdboden, so bindet sie die Elektricität, welcher der ihrigen entgegengesetzt ist, und gleicht sich mit derselben durch einen Blitz aus, welcher im Stande ist die größten Zerstörungen anzurichten.

Der Blitz erscheint bald in der Form einer Wellenlinie, bald als eine aus geradlinigen Stücken zusammengesetzte Zickzacklinie: manchmal besitzt er eine nicht scharf begrenzte Form, sondern erscheint nur als ausgebreitetes Licht, durch welches eine etwas größere Wolkenfläche erleuchtet erscheint; möglich, daß in diesem letzten Falle, den man als Wetterleuchten bezeichnet, der eigentliche Blitz unserem Auge durch vorgelagertes Gewölk verborgen ist. Endlich erwähnt Arago eine Anzahl Fälle, bei denen sich ein Feuerball verhältnißmäßig langsam weiter bewegt, und bezeichnet diese Erscheinung als Kugelblitze: die Natur dieser

Digitized by Google

Erscheinung ist durchaus noch nicht aufgeklärt worden und es ist gar nicht unmöglich, daß sie auf einer optischen Täuschung beruht.

Die Blitze theilen sich nicht selten in mehrere Zweige, andererseits kommen aber bei kurzer Entfernung zwischen der Wolke und der Erde auch Blitze vor, die von der geraden Linie kaum ein wenig abweichen. Die Farbe ist bald weiß, bald blauroth, bald aber auch grünlich. Die mittlere Dauer der Blitze hat Wheatstone während der Nacht mit Hülfe eines Rades gemessen, das eine Menge Speichen aus mattem Silber trug und sich mit sehr großer Geschwindigkeit um seine Axe drehte. Wird das Rad während seiner Umdrehung plötzlich durch ein Licht erleuchtet, das eine merkliche Zeit, vielleicht den zehnten Theil einer Secunde andauert, so wird jede Speiche des Rades breiter erscheinen, als sie wirklich ist, weil sie sich in der Zeit weiter bewegt hat, der Lichteindruck aber auf der Netzhaut unseres Auges eine Zeit lang fortdauert: so erscheinen uns die Speichen eines Wagenrades vervielfacht, wenn sich das Rad schnell dreht. So schnell nun aber auch Wheatstone sein Rad drehte, so schien dasselbe bei jedem Blitzschlage zu ruhen, indem alle seine Speichen vom Auge deutlich unterschieden werden konnten und sich gar nicht zu bewegen schienen: hieraus schloß Wheatstone, daß die Dauer des Blitzes eine außerordentlich kurze ist, daß sie wohl noch nicht den millionsten Theil einer Secunde beträgt.

Das Ueberspringen des Blitzes ist von einem Geräusche begleitet, welches uns unter dem Namen des Donners bekannt ist, und welches um so heftiger und markirter auftritt, je geringer die Entfernung vom Beobachter ist, in welcher der Blitz überspringt. Fast in allen Fällen aber ist die Explosion von einem längere oder kürzere Zeit anhaltenden Rollen begleitet, das aus zweierlei Ursache entsteht. Zunächst hat man gefunden, daß die Blitze nicht selten eine Länge von mehreren Kilometern besitzen, sodaß ihre Endpunkte vom Beobachter sehr verschiedene Entfernungen haben: wenn nun auch der Blitz in demselben Augenblicke der ganzen Länge nach aufleuchtet und dadurch auch der Schall in allen Punkten gleichzeitig entsteht, so wird er von den entfernteren Punkten doch viel später zum Ohre des Beobachters gelangen, da er zum Durchlaufen eines Kilometers ungefähr 3 Secunden gebraucht. Weiter wird aber auch der Schall von den Wolken und von den festen Körpern des Erdbodens zurückgeworfen, sodaß ein vielfaches Echo entsteht, durch welches

Digitized by Google

das Geräusch des Donners verlängert wird. Daß der Donner während seiner Dauer nicht gleichmäßig an Stärke abnimmt, sondern daß er abwechselnd stärker und schwächer wird, hat wohl seinen Grund in der Zickzackform des Blitzes: wo der Blitz durch die Dichtigkeit der Luftschicht gezwungen wird von seiner Bahn etwas abzuweichen, da wird auch eine stärkere Explosion erfolgen, die sich dem Ohre durch gesteigerte Kraft bemerklich macht.

Die Wirkungen des Blitzschlages stimmen ihrer Natur nach mit denen der elektrischen Entladungen der Batterien überein, nur daß sie viel intensiver sind, in dem Grade, als die Menge der Elektricität größer ist. Durch den Blitzschlag wurden Mauern und Felsen gesprengt, wurden Metalle geschmolzen und verflüchtigt, Menschen und Thiere getödtet, und andere gewaltsame Wirkungen hervorgebracht. Eine eigenthümliche Erscheinung zeigt sich, wenn der Blitz in Sand einschlägt, indem man dann in dem Sande weit hinabreichende Röhren findet, die aus geschmolzener Kieselmasse bestehen, und die man Blitzröhren oder Fulgurite nennt: doch auch diese Erscheinung hat man nachgebildet, indem man den Schlag einer starken Batterie durch Sand leitete, der mit Salz gemischt war.

Schlägt der Blitz neben dem Compaß ein, so kann die Magnetnadel durch ihn in entgegengesetztem Sinne magnetisirt werden, und Stahlinstrumente sind in vielen Fällen durch ihn in kräftige Magneten verwandelt worden. Ziehen die Gewitterwolken über den Erdboden hin, so wird derselbe durch Vertheilung elektrisch, und zwar sammelt sich diese Elektricität besonders in den vorspringenden Punkten an und strömt in Form von Lichtbüscheln aus den Spitzen der Blitzableiter und der Masten der Schiffe aus. Durch diese ausströmende Elektricität wird aber auch zugleich die Ladung der Gewitterwolken neutralisirt und die Gewalt derselben gebrochen: daher schrieben die Alten, welche wohl diese wohlthätige Wirkung kannten, ohne jedoch über ihren Grund im Klaren zu sein, die Erscheinung der Thätigkeit der Götter zu und ließen Castor und Pollux in diesem Feuer zur Erde steigen; im Mittelalter trat eine christliche Heilige an die Stelle der heidnischen Götter, nämlich Sankt Helena, nach welcher die Erscheinung in verderbter Form als Sankt-Elmsfeuer noch jetzt bezeichnet wird.

Außer diesen heftigen Entladungen der Elektricität, haben wir bereits

Digitized by Google

früher die schöne Lichterscheinung erwähnt, die ebenfalls mit elektrischen Strömungen in Zusammenhang steht, nämlich das Polarlicht, welches, dafern es sich auf der nördlichen Halbkugel zeigt, auch als Nordlicht bezeichnet wird. Daß diese Erscheinung mit dem Magnetismus der Erde im Zusammenhange steht, daß sie besonders dann auftritt, wenn die magnetischen Ströme unseres Planeten ihre Stärke oder Richtung ändern, ist bereits erwähnt: wir wollen daher hier nur noch einige Bemerkungen über den Anblick, den sie gewährt, hinzufügen.

„Im Norden," sagt Martins in seinem Werke: von Spitzbergen zur Sahara, „zeigt sich die Erscheinung mit einem Glanze und einer Pracht, daß nichts mit ihr verglichen werden kann. Strahlend und wechselnd wie bei einem Kunstfeuerwerke, ändert sich das Schauspiel in jedem Augenblicke. Der Maler hat nicht Zeit genug die Formen und Farben dieser flüchtigen Lichter zu erfassen; der Dichter muß auf ihre Beschreibung verzichten. Niemals gleicht ein Nordlicht dem anderen, sie sind ohne Grenzen verschieden." Das Nordlicht, welches auf Tafel XIII abgebildet ist, wurde von Lottin, welcher an derselben Expedition mit Martins theilnahm, beobachtet, abgebildet und beschrieben: es ist wohl im Stande, von der Pracht dieser Erscheinung eine Vorstellung zu geben. Doch lassen wir den letztgenannten Beobachter weiter reden:

„Bald bestehen die Nordlichter aus einfachem diffusem Lichte oder aus leuchtenden Flächen; bald sind sie aus zuckenden Strahlen von blendendem Weiß gebildet, die sich über das ganze Himmelsgewölbe vom Horizonte an verbreiten: manchmal halten sie in ihrem Wege auf; die unvollendeten Strahlen erreichen das Zenith nicht, sondern das Nordlicht setzt sich an einem anderen Punkte fort; ein Strauß von Strahlen schießt hervor, breitet sich wie ein Fächer aus, um bald darauf zu verbleichen und zu erlöschen. Ein ander Mal flattern lange, goldumsäumte Vorhänge am Himmelsgewölbe, welche sich auf tausenderlei Weise zusammenfalten und in eine Wellenbewegung gerathen, als ob der Wind sie jagte. Scheinbar sind sie nicht hoch in der Atmosphäre erhaben und man staunt, daß sich ihre Bewegung durch keinen Laut bemerklich macht. Am häufigsten grenzt sich nach Norden hin ein Lichtbogen ab, der vom Horizonte durch einen schwarzen Kreisausschnitt getrennt ist, zu welchem er durch die lebhaften weißen oder rothen Farben seiner Strahlen einen scharfen Gegensatz bildet. Dieser Bogen dehnt sich aus, theilt sich, und

Digitized by Google

sendet fächerförmige Strahlen aus, welche bald den ganzen nördlichen Himmel erfüllen, sich immer mehr ausdehnen, und schließlich in der Nähe des Zenithes eine Krone bilden, von welcher aus neue Lichtbündel nach allen Richtungen hin hervorschießen. Jetzt gleicht der Himmel einer Lichtkuppel und Blau, Grün, Gelb, Roth und Weiß spielen in einander in den zitternden Strahlen des Lichtes. Aber dieses glänzende Schauspiel dauert nur wenige Augenblicke: zuerst hört das Hervorschießen der Lichtstrahlen von der Krone auf, welche selbst allmählich erblaßt: diffuses Licht erfüllt den Himmel und hier und da breiten sich Lichtflächen gleich leichtem Gewölk aus und ziehen sich in regelmäßigen Zuckungen wieder zusammen, um ebenfalls in kurzer Zeit zu erbleichen. Allmählich werden die Bilder immer unklarer und verwaschener und das Licht der Sterne, welches durch den Glanz des Nordlichtes überstrahlt war, tritt mit neuer Kraft hervor, und die lange, dunkle Polarnacht herrscht von Neuem unbeschränkt über den eisigen Wüsten des Landes und des Oceans."

Bravais hat die Formen von einer großen Zahl sehr regelmäßig gestalteter Lichtbogen untersucht, welche gleichzeitig von zwei Beobachtern gemessen wurden, deren einer sich in Bossekop, der andere in den um 15 Kilometer davon entfernten Jupvig befand, und kam zu dem Resultate, daß diese Bogen Theile von Kreisen sind, deren Mittelpunkte immer in der Richtung der Neigungsnadel liegen, sodaß auch hier wieder, wie beim Regenbogen jeder Beobachter sein eigenes Nordlicht sieht. Die Höhe der Nordlichter vom Erdboden schätzt er auf etwa 100 bis 200 Kilometer, sodaß dieselben ungefähr in der Höhe entstehen, bis zu welcher unsere Atmosphäre reicht. Der Glanz der Nordlichter ist so stark, daß Bravais bei dem hellsten eine enggedruckte Seite fast ebensogut lesen konnte, wie beim Lichte des Vollmondes.

Diese Erscheinung, welche die Nächte des Polarbewohners erhellt, ist auch uns durchaus nicht fremd, und in mancher schönen Herbst- und Winternacht sehen auch wir die milden Strahlen dieser gefahrlosen elektrischen Entladung an unserem Nordhimmel aufsteigen. Freilich zu solchem Glanze, wie in den Polargegenden selbst entwickelt sich die Erscheinung bei uns niemals. Dafür müssen wir aber auch nicht, wie der Polarbewohner, die andere Art der elektrischen Entladung vollständig entbehren, die durch Reinigen der Luft eine große Wohlthat gewährt, wenn sie auch bisweilen locale Zerstörungen verursacht. Was sind aber

Digitized by Google

die Zerſtörungen durch das Gewitter in unſeren Gegenden, gegenüber den Verheerungen, die daſſelbe in den Tropenländern anrichtet? Und ſo können wir ſagen, daß auch in dieſer Beziehung, wie in ſo mancher anderen, unſere Wohnſitze vor vielen anderen der Erde bevorzugt ſind: uns iſt der Anblick keiner dieſer Naturerſcheinungen verſagt, und doch tritt jede in der Regel in einem Grade auf, der unſere Exiſtenz nicht in Frage ſtellt.

Digitized by Google

Verzeichniß

der Chromolithographien und der Abbildungen außerhalb des Textes.

			Seite
Tafel	I.	Schiefer Thurm zu Pisa	48
=	II.	Luftpumpe von Bianchi, Gesammtansicht	116
=	III.	Erscheinungen der Reflexion des Lichtes	238
=	IV.	Geister-Erscheinungen durch Spiegelung	258
=	V.	Classification der Farben nach Chevreul. Reine Farben .	307
=	VI.	Classification der Farben nach Chevreul. Gedämpfte Farben	307
=	VII.	Farbenscala des Violet und des Gelb	307
=	VIII.	Spectra verschiedener Lichtquellen	309
=	IX.	Beugung durch kleine Oeffnungen. Einfarbige Streifen .	339
=	X.	Beugung durch Gitter. Vielfarbige Streifen	342
=	XI.	Farbige Ringe dünner Blättchen. Seifenblase	349
=	XII.	Farbige Ringe in ein- und zweiaxigen doppelbrechenden Krystallen	373
=	XIII.	Nordlicht	498
=	XIV.	Elektrisirmaschine nach Otto von Guerike	524
=	XV.	Scheiben-Elektrisirmaschine	524
=	XVI.	Veräftelter und gebuchteter Funke nach Van Marum . .	591
=	XVII.	Elektrisches Licht in verdünnten Gasen	599
=	XVIII.	Luftspiegelung in der afrikanischen Wüste	601
=	XIX.	Doppelter Regenbogen	604
=	XX.	Schneekrystalle nach Scoresby	611

Leipzig, Druck von Alexander Edelmann.

Digitized by Google

Berichtigungen.

Seite	179	Zeile	14 v. o. lies §. 7. statt §. 6.
"	333	"	13 v. u. lies Sechstes statt Viertes.
"	350	"	7 v. u. lies Siebentes statt Fünftes.
"	379	"	1 v. o. lies Achtes statt Siebentes.
"	388	"	1 v. o. lies Neuntes statt Achtes.
"	412	"	9 v. o. lies §. 3. statt §. 2.
"	419	"	5 v. u. lies §. 4. statt §. 3.
"	423	"	5 v. u. lies §. 5. statt §. 4.
"	428	"	6 v. o. lies §. 6. statt §. 5.

Auf Tafel XII, deren Nummer fehlt, lies zweiaxigen statt zweimaligen.

Tafel IX (Beugung durch kleine Oeffnungen) ist irrthümlicher Weise als Tafel V, und ebenso Tafel XI (Farbige Ringe dünner Blättchen. Seifenblase) als Tafel XIX bezeichnet.

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

UNIVERSITY OF CALIFORNIA
LIBRARY

This is the date on which this book was charged out.

AUG 14 1911

[30m-6,'11]

Das buch der physikalischen erscheinungen. G83

Aug 14'11 Saxer AUG 24 1911

YD 04990

QC21
G83
147105

UNIV ARY